

Arbeitsgruppe Reaktorbetrieb
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
des Landes Nordrhein-Westfalen

Unterkritische Versuche für den FRJ - 1
(Merlin - Jülich)

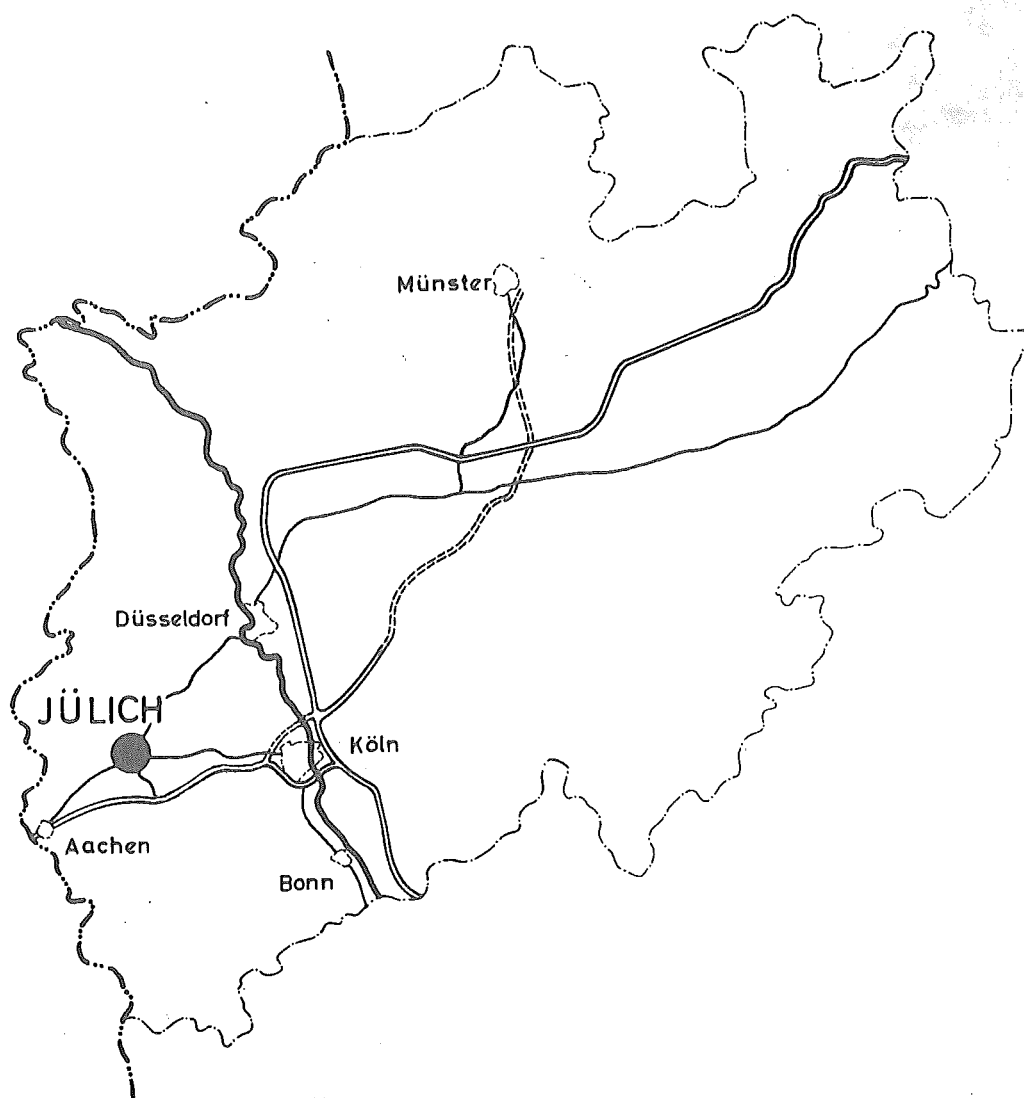
von

J. Jacquemin
H. Friedewold
u. W.M. Cooper

JÜL - 26 - RE

November 1961

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 26

Arbeitsgruppe Reaktorbetrieb Jül – 26 – RE

Dok.: FRJ – 1 – CRITICALITY STUDIES * DK 621.039.524.44.013 (43) FRJ – 1

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Unterkritische Versuche

für den FRJ - 1 (MERLIN - JÜLICH)

von J. Jacquemin
H. Friedewold und
W.M. Cooper

ZUSAMMENFASSUNG

In einer Versuchsanlage in dem AEI-Research Laboratory in Aldermaston/Berks. in England wurden unterkritische Experimente für den FRJ-1 (MERLIN - JÜLICH) durchgeführt. Dabei wurde die kritische Masse für die folgenden Kernanordnungen bestimmt: kompakter Kern, quadratischer, länglicher und U-förmiger Kern, sowie Kerne mit zentralen Luft- und Wasservoids. Für eine Reihe dieser Kernfigurationen wurde die Wirksamkeit des Grob- und des Feinregelementes bestimmt. Weitere Messungen bezogen sich auf die Ermittlung des Temperaturkoeffizienten von Kern und Reflektor, sowie auf die Verteilung der statistischen Gewichte und des Voidkoeffizienten der Reaktivität im kompakten Kern. Die Ergebnisse der Messungen sind in der Übersichtstabelle am Schluß zusammengestellt.

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
1. Einleitung	1
2. Beschreibung der Versuchsanlage	2
2.1 Ausführung der Versuche	8
3. Bestimmung der kritischen Masse	11
3.1 Kompakter Kern	12
3.2 Quadratischer Kern	14
3.3 Länglicher Kern	16
3.4.1 Kern mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid	17
3.4.2 Kern mit zentralem 3'' x 3'' Wasservoid	20
3.5 Kern mit 4 fehlenden zentralen Brennelementen	21
3.6 U-förmiger Kern	22
4. Bestimmung des Wertes der Regelelemente	23
4.1 Bestimmung der Wirksamkeit des Feinregelelementes	24
4.1.1 Kompakter Kern	24
4.1.2 Länglicher Kern	27
4.1.3 Kern mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid	28
4.1.4 Kern mit zentralem 6'' x 6'' Luftvoid	29
4.2 Bestimmung der Wirksamkeit des Grobregelelementes	30
4.2.1 Kompakter Kern	30
4.2.2 Länglicher Kern	31
4.2.3 Kern mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid	32
4.2.4 Kern mit zentralem 6'' x 6'' Luftvoid	32
5. Bestimmung des Temperaturkoeffizienten der Reaktivität	34
5.1 TK des kompakten Kerns	35
5.2 TK des länglichen Kerns	37
5.3 TK des Kerns mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid	37
5.4 TK des Kerns mit zentralem 3'' x 3'' Wasservoid	38
6. Bestimmung des statistischen Gewichts im kompakten Kern	39
6.1 Bedeutung des statistischen Gewichtes	39
6.2 Experimentelle Ermittlung der statistischen Gewichte im kompakten Kern	40
7. Bestimmung des Voidkoeffizienten des kompakten Kerns	43
7.1 Bedeutung des Voidkoeffizienten	43
7.2 Durchführung der Messungen	44
7.3 Kalibrierung der Al-Streifen	45
7.4 Messergebnisse	46
7.4.1 Ermittlung des mittleren Voidkoeffizienten der Reaktivität im kompakten Kern	46

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
7.4.2 Verteilung des Voidkoeffizienten in zwei zueinander senkrechten Brennelementreihen im kompakten Kern	47
8. Schluß	50
9. Literaturhinweise	51
10. Anhang	52
11. Übersichtstabelle	54

1. Einleitung

Zum Betrieb eines Reaktors, insbesondere zu seinem erstmaligen Anfahren ist die Kenntnis einer Reihe von Daten, die das kritische Verhalten betreffen, notwendige Voraussetzung. Diese Kenntnis läßt sich einerseits aus theoretischen Überlegungen und Berechnungen erlangen, deren Grundlagen meistens den Erkenntnissen und Erfahrungen an anderen Reaktoren entnommen sind. Die Berechnungen enthalten immer gewisse Idealisierungen, so daß man mit mehr oder weniger großen Abweichungen von den wirklichen Verhältnissen rechnen muß. - Eine andere Methode zur Ermittlung des kritischen Verhaltens des Reaktors besteht darin, in einer besonderen Versuchseinrichtung den Reaktor soweit wie möglich zu simulieren und aus den gemessenen Werten Schlüsse auf seinen Zustand im Falle der Kritikalität zu ziehen.

In einer Vereinbarung zwischen der Firma AEI und der Arbeitsgruppe Reaktorbau des Kultusministeriums des Landes NRW beschloß man, unterkritische Versuche für den Reaktor FRJ - 1 (MERLIN - Jülich) in der unterkritischen Anlage in dem AEI-Research-Laboratory in Aldermaston/Berkshire (England) durchzuführen. Hierfür stellte die Firma AEI einige Mitarbeiter der Anlage zur Verfügung. Von der Arbeitsgruppe Reaktorbau nahmen Dr. H. Friedewold und Dr. J. Jacquemin an den Versuchen teil. Verantwortlicher Leiter der Versuche war Mr. W.M.Cooper von der Firma AEI.

Die Grundlage zu diesen unterkritischen Versuchen bildete das "PROGRAMME FOR THE SUBCRITICAL EXPERIMENTS OF THE FRJ-1" von Dr. W. Porschen und Mr. W.M. Cooper. ¹⁾ Für die Durchführung der Experimente war ursprünglich ein Zeitraum von 6 Monaten vorgesehen, doch konnte durch eine Verlängerung von weiteren zwei Monaten noch eine Reihe zusätzli-

cher Messungen gemacht werden.

2. Beschreibung der Versuchsanlage ²⁾

Zu der unterkritischen Anlage gehören zwei aus Kunststoff ('Resilon') gefertigte Wasserbehälter - ein Brennstoff- oder Kerntank und ein unterirdisch gelagerter gleichgroßer Ablauf-tank. Bei normaler Füllung können sie jeweils ca. 2 000 ltr. demineralisiertes Wasser aufnehmen (s. Abb. 1). In dem Brennstofftank ist eine Gitterplatte eingebaut (s. Abb. 2), die der Gitterplatte im Reaktor MERLIN völlig entspricht. Dadurch lassen sich analoge Verhältnisse wie im Reaktor schaffen, natürlich soweit dies mit den Sicherheitsvorschriften der unterkritischen Anlage vereinbar ist. Der Brennstofftank wird mit Hilfe einer Zentrifugalpumpe mit demineralisiertem Wasser gefüllt, das normalerweise in dem Ablauftank aufbewahrt wird. Im Boden bzw. an den Seitenwänden des Kerntanks sind mehrere Bohrungen für den Zu- und Ablauf des Wassers angebracht. Während der Messung werden die Ablaufrohre mit besonders konstruierten elektromagnetischen Ventilen geschlossen. Bei einer Unterbrechung des Haltekreises für diese Ventile bewirkt ein Gegengewicht eine sofortige Öffnung. Durch den Einbau von Überlaufrohren wird stets die gleiche Wasserhöhe erreicht, so daß das als Reflektor und Moderator dienende Wasser bei allen Messungen gleich hoch über dem Kernbrennstoff steht. Während der Messung wird das Wasser dauernd umgewälzt. Dies ist für eine gleichmäßige Temperaturverteilung - in der Regel wurde bei einer Temperatur von 25° C gearbeitet - erforderlich. Die Temperatur wird von einem Thermostaten reguliert, der am Boden des Ablauftanks eingebaut ist. Im Bedarfsfalle können drei Erhitzer (je 6 kW) eingeschaltet werden, die bei längerem Betrieb

Abb. 1

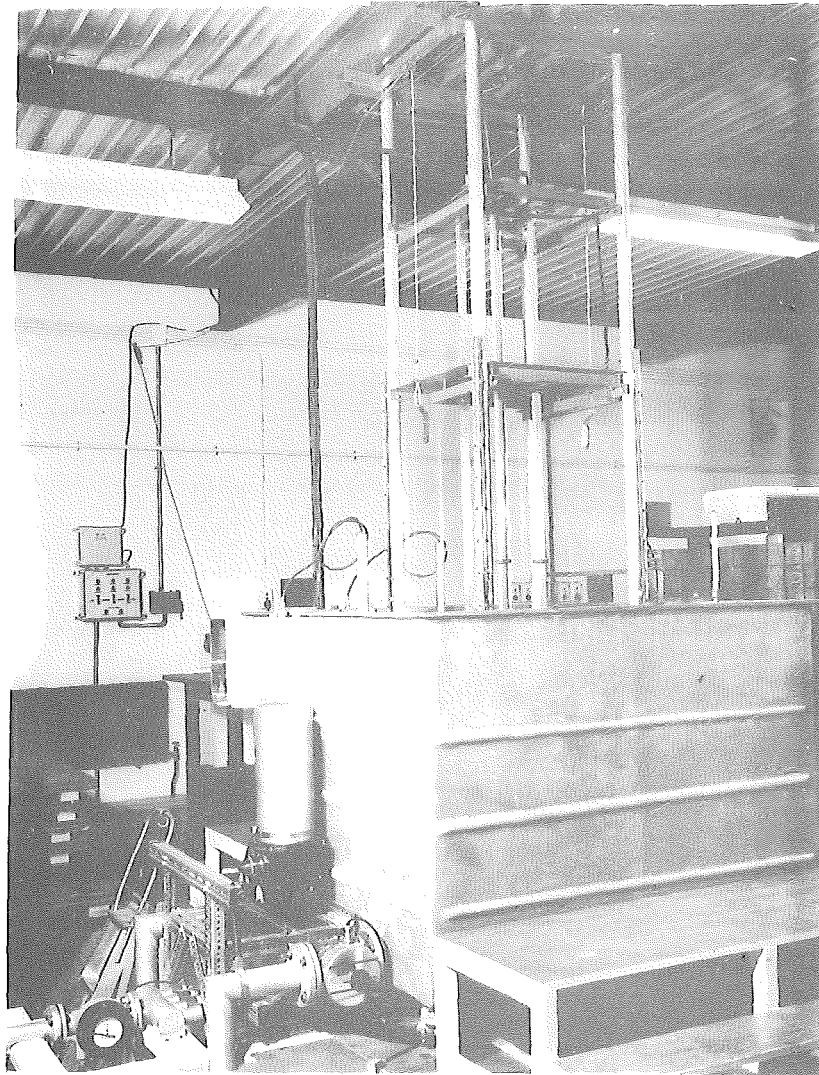
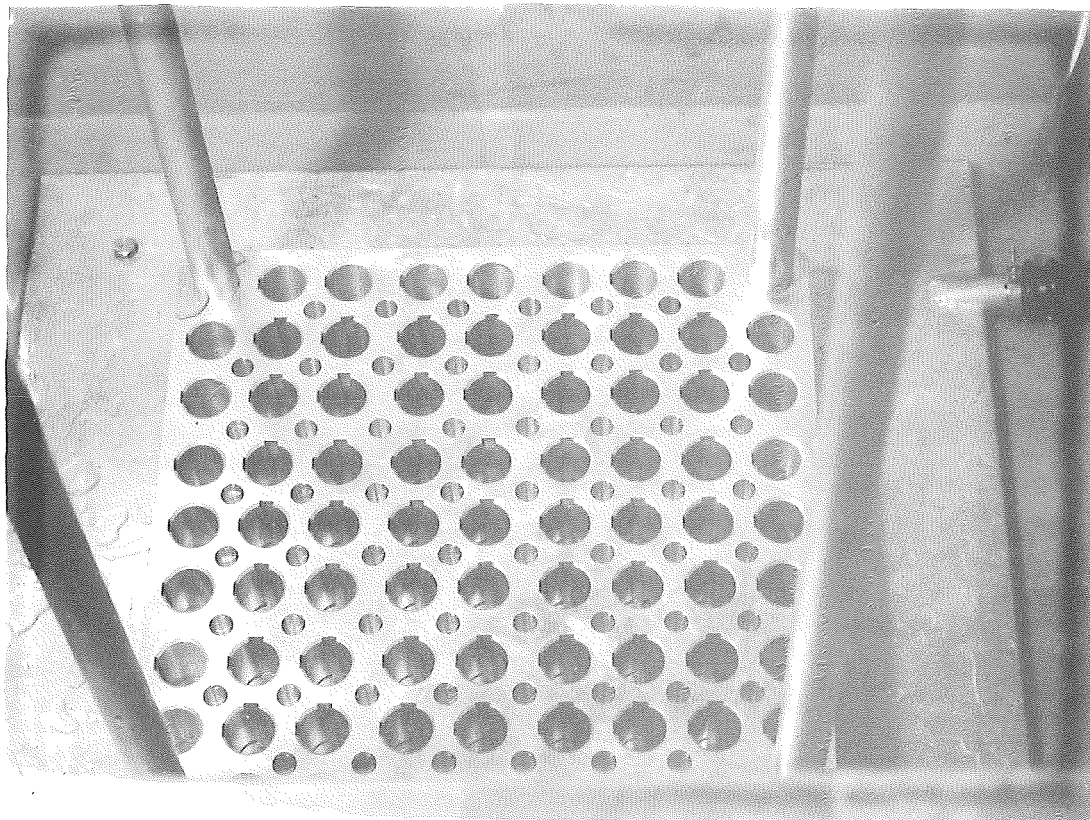


Abb. 2



eine kontinuierliche Temperaturerhöhung bewirken - etwa 8 Stunden für den Bereich von 15 - 55° C. In dem Abblaßtank ist stets soviel Wasser vorhanden, daß die Erhitzer gleichmäßig bedeckt sind.

Die Brennelemente stehen in der Gitterplatte im Brennstofftank. Diese Gitterplatte ist aus reinem Aluminium gefertigt und nicht aus einer Speziallegierung wie im Reaktor. Sie wird an den Ecken von vier Aluminiumrohren (2" Ø) gehalten. Vier Stahlträger halten dieses "Gerüst" oben zusammen, die auch gleichzeitig zwei Motore und die Kabeltrommeln mit den Magnetkupplungen für die beiden Sicherheitselemente tragen. Die Sicherheitselemente sind identisch mit den im Reaktor verwendeten. Sie sind jeweils an einem Gestänge befestigt, das in einer Führung gleitet und einen oberen und unteren Abschaltkontakt besitzt. Sie sind mechanisch und elektrisch völlig unabhängig. Nur ihre Anordnung unterscheidet sich von derjenigen im Reaktor: sie sind nebeneinander angeordnet und nicht diagonal. Die beiden Regелеlemente entsprechen ebenfalls völlig denen des Reaktors. Sie sind auch an einem Gestänge befestigt, das in einer Führung gleitet und nur von Hand bewegt und mittels einer Schraube in jeder beliebigen Lage arretiert werden kann. An den vier Al-Rohren der Gitterplatte sind Al-Gitter bis zur Höhe der Brennelemente angebracht. Oberhalb dieser Gitter dienen die Rohre als Führung für einen Plexiglas-Schutzschild, der jede Veränderung an der Kernanordnung während des Betriebes verhindern soll. Auch er besitzt einen Schalter für das Sicherheitssystem der Anlage, der beim Erreichen der tiefsten Stellung des Schutzschildes betätigt wird.

Der elektrische Teil der subkritischen Anlage besteht im wesentlichen aus dem Kontroll- und dem Sicherheitssystem. Das Kontrollsystem hat einen doppelten Zweck: einmal sollen alle Bedienungen der Anlage - mit Hilfe des Verriegelungs- und Unterbrechersystems - in einer solchen vorbestimmten Reihenfolge durchgeführt werden, die eine maximale Sicherheit bei den unterkritischen Experimenten gewährleistet und zum andern soll die Anlage beim Überschreiten vorher festgesetzter Grenzwerte bzw. Ausfall eines Gerätes abgeschaltet werden. Zum Kontrollsystem gehört eine Kontroll- und eine Steuereinheit. Auf der Kontrolleinheit wird durch grüne bzw. rote Lämpchen angezeigt, ob die Anlageteile, die eine Abschaltung der Anlage verursachen können, in Ordnung sind oder nicht. Diese Teile sind im einzelnen: 3 Neutronenzählkanäle, ein γ -Monitor, der Plexiglasschutzschild über dem Kern und das von Hand auslösbare Notabschaltsystem. Die Relais dieser Vorrichtungen sind in Reihe zwischen je zwei Relais der beiden Sicherheitslinien geschaltet. Die Sicherheitslinien wirken unabhängig voneinander. Wenn sie aus irgendeinem Grunde unterbrochen waren, müssen sie durch Drücken einer Taste von Hand wieder geschlossen werden. Sie wirken eng zusammen mit den beiden Sicherheitselementen im Kerntank, dem Motor der Pumpe und dem Elektromagnet des Ventils. Erst beim Aufleuchten der grünen Lampe des Sicherheitssystems kann man von der Steuereinheit aus die Apparatur in Betrieb setzen. - Die gesamte Anlage kann nur arbeiten, wenn mit einem Hauptschlüssel ein Schlüsselschalter betätigt worden ist. Nur der verantwortliche Leiter der Versuche besitzt diesen Schlüssel.

Für die unterkritischen Versuche wird eine Po + Be-Neutronenquelle von 1 C Stärke (Halbwertszeit 138 Tage) benutzt. Sie emittiert ca. $1 - 3 \times 10^6$ n/sec. Der Vorteil dieser Quellen besteht in der geringen γ -Strahlung. Die in eine Plexiglashülle eingebrachte Quelle wird in eine Bohrung in der Mitte der Gitterplatte eingesetzt. Als Neutronendetektoren werden drei BF_3 -Proportionalzähler verwendet. Diese sind in Al-Hülsen wasserdicht untergebracht. Mit einer besonderen Klemmvorrichtung kann ihre Stellung auf drei verschiedenen Seiten der Kernanordnung den jeweiligen Versuchen angepasst werden. In unmittelbarer Nähe des Detektors ist der Vorverstärker am Rand des Kerntanks befestigt. Von dort werden die Impulse des BF_3 -Zählrohrs zum Hauptverstärker geleitet und anschließend dem automatischen Zähler bzw. dem Mittelwertsanzeiger zugeführt. Mit dem Mittelwertsanzeiger verbunden ist eine Grenzwerteinheit, die bei Übersteigen einer vorher eingestellten Impulsrate das gesamte System abschaltet. Alle diese Geräte bilden zusammen mit einer Hochspannungseinheit einen BF_3 -Kanal. Die drei Kanäle können von einer Zeitgebereinheit einzeln oder auch gemeinsam gesteuert werden, so daß wirklich in gleichen Zeitintervallen gemessen werden kann.

Abb. 3 gibt einen Überblick über die gesamte unterkritische Versuchseinrichtung. Auf der rechten Seite der Abb. erkennt man in den Gestellen die 3 Zählkanäle, sowie die Kontroll- und Steuereinheit.

Zur Überwachung der unterkritischen Anlage auf γ -Strahlung sind drei γ -Monitore (Ionisationskammern) angebracht, wovon einer in unmittelbarer Nähe des Kerntanks auf das Sicherheitssystem wirkt. Diese Ionisationskammer ist auf eine minimale

Dosisleistung von 1 mR/Std. und eine maximale Dosisleistung von 10 mR/Std. eingestellt. Durch eine kleine eingebaute γ -Quelle wird eine Dosisleistung von etwas mehr als 1 mR/Std. erzeugt, so daß die untere Schwellenabschaltung nur bei Ausfall der Ionisationskammer anspricht.

Die subkritische Versuchseinrichtung kann durch folgende Vorrichtungen abgeschaltet werden:

- 1.) der Hauptschlüssel wird abgezogen
- 2.) der eingestellte Grenzwert einer der drei Kanäle wird erreicht
- 3.) der γ -Monitor erreicht seinen oberen oder unteren Grenzwert
- 4.) einer der vier an verschiedenen Stellen des Raumes angebrachten Notabschaltknöpfe wird betätigt
- 5.) der Schutzschild aus Plexiglas ist nicht genügend tief auf die Kernanordnung herabgelassen, bzw. er wird von Hand angehoben.

In einem solchen Falle öffnen sich sofort die elektromagnetischen Ventile, so daß das Wasser des Brennstofftanks in ca. 1 - 2 min. in den Abblaßtank abgelaufen ist. Außerdem werden gleichzeitig die Magnetkupplungen der Sicherheitsstäbe gelöst. Denn da in der Regel nicht mit eingefahrenen Sicherheitselementen gemessen wird, befinden sich diese oberhalb des Kernes und fallen infolge ihres Gewichtes sofort in die aufgebaute Kernanordnung im Brennstofftank.

Zu der unterkritischen Anlage gehört noch ein besonderer abschließbarer Raum ('fuel storage'), - er ist leider auf Abb. 3

Abb. 3

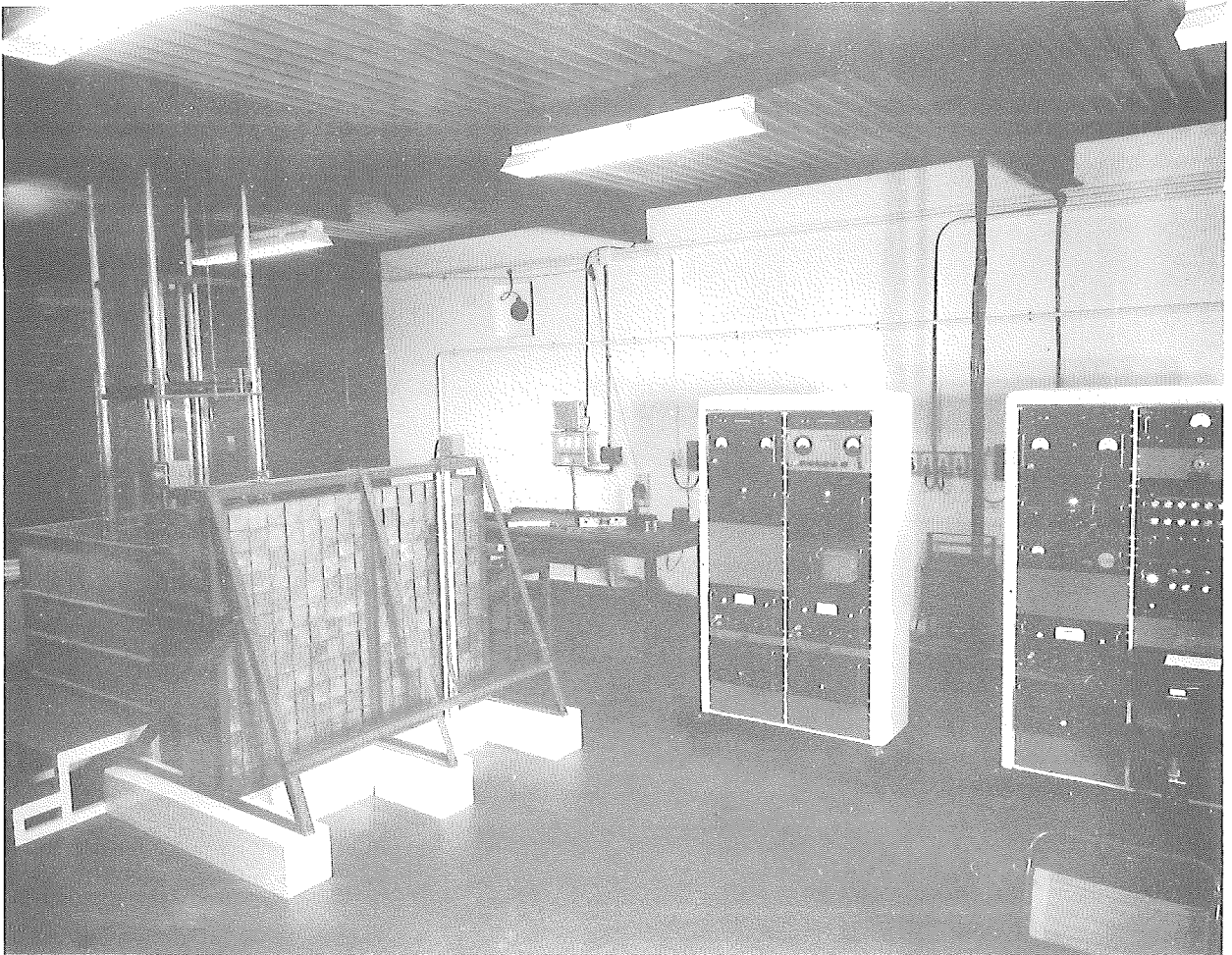
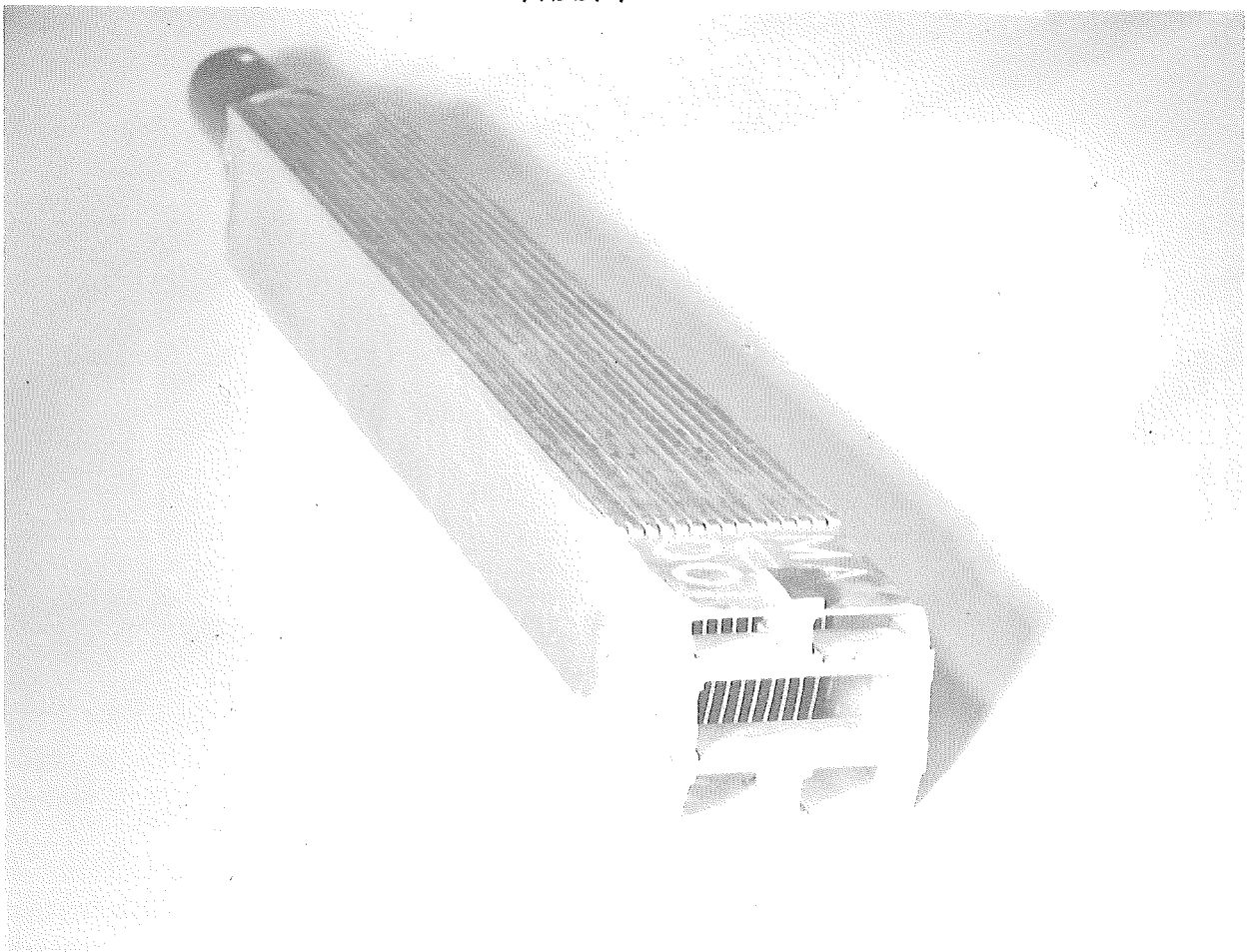


Abb. 4



nicht zu erkennen - in dem die neuen - praktisch noch nicht aktiven - Brennelemente in Stahlschränken aufbewahrt werden. Die Stahlschränke sind fest angeschraubt und verschließbar. Aus Kritikalitätsgründen können jeweils in einem Schrank nicht mehr als 14 Voll- und 2 Teilelemente untergebracht werden. In den Schränken werden die Brennelemente noch einmal einzeln unter Verschuß gehalten. Die Schlüssel dazu sowie die Schlüssel für die Stahlschränke und für den Lagerraum werden im Reaktorkontrollraum von dem ersten Reaktoroperator aufbewahrt und nur gegen Vorlage eines schriftlichen Antrages des Versuchsleiters der subkritischen Anlage für die jeweils benötigten Brennelemente ausgegeben. Dieser Antrag, der eine Abschätzung der benötigten Brennstoffmenge enthält, muß vom Reaktorphysiker genehmigt und unterzeichnet sein.

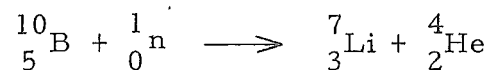
Von den Brennelementen des FRJ - 1 (MERLIN - JÜLICH) standen für die unterkritischen Versuche 28 Voll- und 4 Teilelemente zur Verfügung. Die Vollelemente besitzen je 14 Brennstoffplatten einer U-Al-Legierung - mit nominell 11,5 g U^{235} pro Platte bzw. 161 g U^{235} pro Brennelement. In Abb. 4 ist ein MERLIN Brennelement dargestellt. Die Teilelemente enthalten je 1, 2, 4 oder 6 Brennstoffplatten mit nominell 11,5, 23, 46 oder 69 g U^{235} . Der genaue U-Gehalt der einzelnen Brennelemente konnte den Datenblättern entnommen werden, die vom Hersteller mit den Brennelementen mitgeliefert wurden.

11,5 · 14
161
161 g U^{235} / Voll-
element

2.1 Ausführung der Versuche

Eine Kernanordnung kann nur dann aufgebaut werden, wenn erstens der Brennstofftank völlig von Wasser entleert und zweitens der Schutzschild aus Plexiglas angehoben worden ist - automatisch sind dann auch die beiden Sicherheitsstäbe eingefahren. Erst danach können die numerierten Brennelemente in die Gitterplatte eingesetzt werden nach einem Schema, das vorher vom Leiter der Versuche auf einer Brennstoffladetafel angegeben worden ist. Diese Tafel hängt gut sichtbar in unmittelbarer Nähe des Brennstofftanks. Nach Beendigung des Ladens überprüft der verantwortliche Leiter noch einmal die Kernanordnung. Dann wird der Schutzschild heruntergelassen, die Abschaltrelais für die einzelnen Neutronenzählrohre und für den γ -Monitor werden erregt, so daß der Sicherheitskreis geschlossen ist und die Sicherheitsstäbe herausgefahren werden können. Dann erst lassen sich die Ventile schließen und die Pumpe kann eingeschaltet werden. Nach ca. 16 - 18 Minuten ist der Kerntank gefüllt und die Apparatur ist zählbereit. In der Regel werden zwei, in einigen Fällen auch drei Messungen über einen Zeitraum von je 5 Minuten durchgeführt. Danach wird die Pumpe abgestellt, werden die Ventile geöffnet und schließlich in einer Zeitdauer von 1 - 2 Minuten die Sicherheitsstäbe hereingefahren. Bei einer Gesamtmeßdauer von 10 Minuten nimmt somit eine Messung etwa 25 - 30 Minuten in Anspruch, ehe man zur nächsten Kernfiguration übergehen kann. Die Sicherheitsvorschriften verlangen, daß zu Beginn eines Arbeitstages die letzte Messung des vorherigen Tages wiederholt werden muß. Beide Messungen sollen innerhalb der Meßgenauigkeit übereinstimmen.

Der Verlauf einer Meßreihe soll kurz erläutert werden. Zunächst einmal wird der Brennstofftank ohne Brennstoff, jedoch mit eingebauter Po + Be-Quelle mit Wasser gefüllt. In den BF_3 -Zählrohren werden also die von der Quelle herrührenden Neutronen infolge der Reaktion:



gemessen. Die auf die Zählrohrwand treffenden α -Teilchen lösen nur kleine Impulse aus. Man benötigt daher stets einen Vorverstärker. Die Zählrate (Imp/sec), die nur durch die Anwesenheit der Quelle hervorgerufen wird, sei mit SC (source count) bezeichnet. - Werden nun Brennelemente in die Gitterplatte eingesetzt, so bewirken die Quellneutronen infolge der Moderator- und Reflektoreigenschaft des Wassers Kernreaktionen in dem Brennstoff, wodurch weitere Neutronen entstehen. Man kann die Wirkung des Wassers als Moderator und Reflektor sehr gut beim Füllen des Kerntanks am Mittelwertanzeiger verfolgen: beim Ansteigen des Wasserspiegels bis zur Höhe des aktiven Teils der Brennstoffplatten steigt der Neutronenfluß und damit die Zählrate gleichmäßig an bis auf einen Wert, der durch die betreffende Kernanordnung und der Stellung der BF_3 -Zählrohre gegeben ist. Beim weiteren Ansteigen des Wasserspiegels nimmt die Zählrate durch die Reflexionen sehr stark zu. Dies kann in der Nähe des kritischen Zustandes infolge der großen Zeitkonstante der Meßinstrumente - sie betrug in der Regel 20 sec - sehr leicht zum Überschreiten der vorher eingestellten Grenzwerte und damit zum Abschalten des Systems führen. In solchen Fällen werden die Pumpen mehrmals gestoppt, so daß sich eine Art "Gleichgewichtszustand" einstellen kann. Die dabei mit den

BF₃-Zählern ermittelte Zählrate (Imp./sec) werde mit CR ("counting rate") bezeichnet. Dann ist das Verhältnis

$$\frac{CR}{SC} = M$$

die unterkritische Multiplikation. Der reziproke Wert

$$\frac{1}{M} = \frac{SC}{CR}$$

werde mit RCR ("reciprocal counting ratio") bezeichnet. Das Produkt aus M und RCR muß also den Wert 1 ergeben, was aus Sicherheitsgründen in jedem Falle nachgeprüft wird. Trägt man in einem Diagramm die Werte für RCR gegenüber der geladenen U²³⁵ Menge auf, so ergibt sich mit zunehmender Brennstoffmenge eine monoton abnehmende Kurve. Für verschwindendes RCR - oder was dasselbe bedeutet: unendlich großer Multiplikation - wird der kritische Zustand des Systems erreicht, die dazugehörige Brennstoffmenge wird als kritische Masse bezeichnet. (s.u.) Für die unterkritische Anlage bestehen in diesem Zusammenhang folgende Sicherheitsvorschriften:

- 1.) Die anfänglich geladene Brennstoffmenge darf nicht mehr als 50 % der geschätzten kritischen Masse betragen. Jede Brennstoffzunahme hat so zu erfolgen, daß die Multiplikation nach jeder Beiladung höchstens verdoppelt wird.
- 2.) Es darf insgesamt nicht mehr als 99,1 % der kritischen Masse geladen werden. Vor jeder neuen Ladung muß aus den gemessenen Werten die kritische Masse aus der Zeichnung ermittelt werden.

Alle in der subkritischen Anlage durchgeführten Versuche bedürfen grundsätzlich der schriftlichen Genehmigung des Physikausschusses der Reaktor-Sektion der Firma AEI (Aldermaston) und des Sicherheitsausschusses, einem aus weitgehend unabhängigen Mitgliedern bestehenden Ausschuß. Zu Beginn der Versuche war eine generelle Genehmigung des o. a. Programms vom "Minister of Fuel and Power" in London erteilt und die Verantwortlichkeit für die Ausführung auf den Sicherheitsausschuß übertragen worden.

Bevor näher auf die Ausführung der Versuche eingegangen wird, soll noch erwähnt werden, daß solche Brennelemente benutzt wurden, die für den späteren Betrieb des Reaktors FRJ-1 (MERLIN-JÜLICH) vorgesehen sind. Ebenso wurden die in den Reaktor einzubauenden Regelelemente zu den unterkritischen Versuchen verwendet.

Auswertung und Diskussion der Meßergebnisse

3. Bestimmung der kritischen Masse

Die unterkritische Anlage ist in ihrem Aufbau im wesentlichen auf die Ermittlung einer Brennstoffmenge bzw. einer Mengenänderung des Kernbrennstoffes eingerichtet. Denn es wird stets die Neutronenvervielfachung infolge einer Mengenänderung gemessen. Alle abgeleiteten Größen, z. B. der Wert der Regelelemente, der Temperaturkoeffizient, die statistischen Gewichte usw. werden primär durch die dieser Größe äquivalente U^{235} -Menge ausgedrückt. Um diese Mengenänderung in eine Reaktivitätsänderung anzugeben, ist die Kenntnis eines Umrechnungsfaktors erforderlich. (s. u.).

Gemäß dem Programm für die unterkritischen Versuche sollte die kritische Masse verschiedener Kernänderungen bestimmt werden.

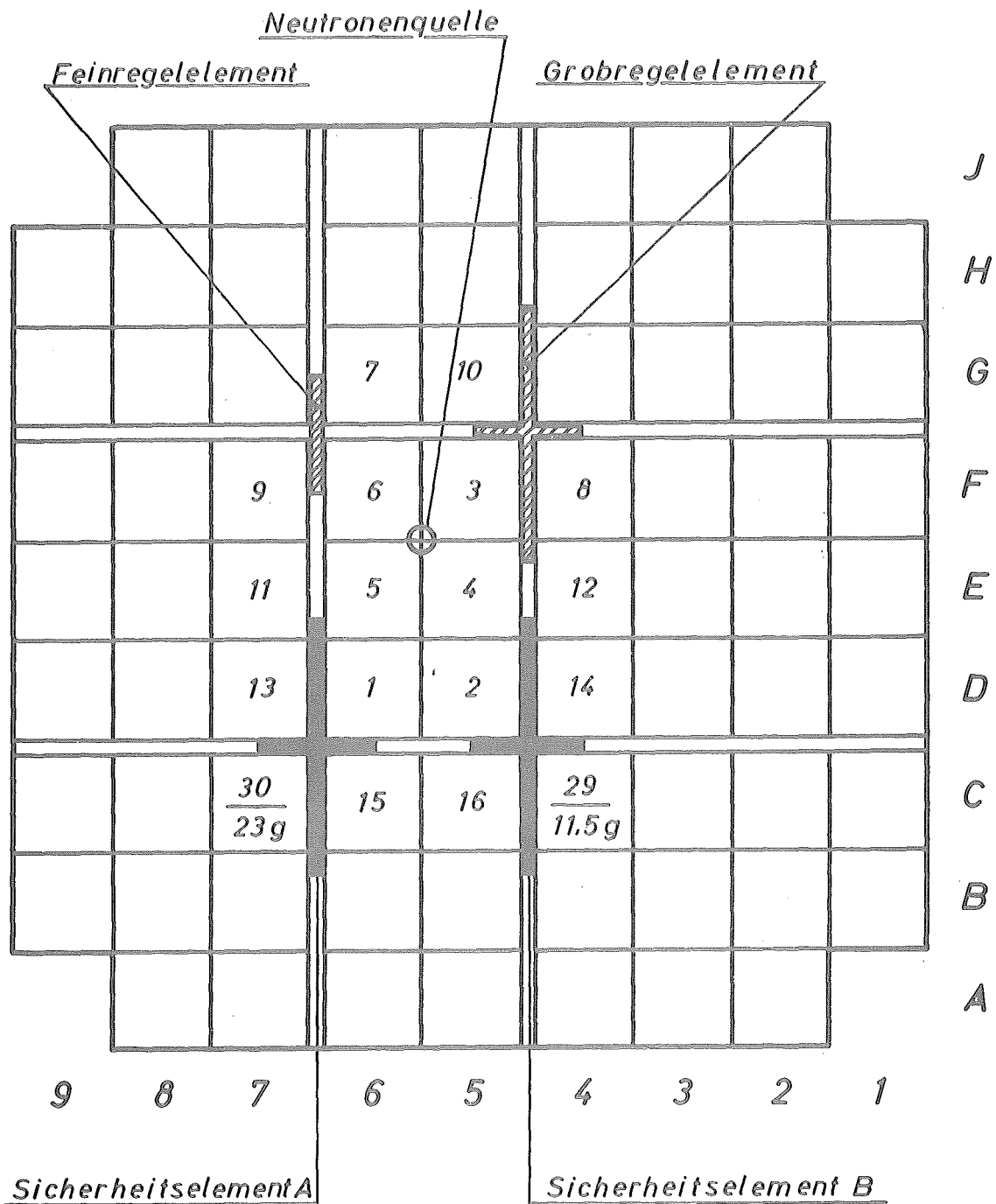
3.1 Kompakter Kern

Die Ermittlung der kritischen Masse einer bestimmten Kernanordnung geschieht in der oben kurz angedeuteten Weise: bei jeder Brennstoffladung bzw. -zuladung wird die Multiplikation bzw. das RCR ermittelt und in einem Diagramm gegenüber der geladenen U^{235} -Menge aufgetragen. Die Regel- und Sicherheitselemente sind dabei ausgefahren.

In Abb. 5 ist das Ladungsschema der letzten Ladung des kompakten Kerns angegeben. Die Ziffern in den einzelnen Feldern geben die Reihenfolge an in der die Elemente in den Tank geladen wurden. Beginnend mit einer Ladung von 7 Brennelementen mit 1125,61 g U^{235} erfolgte der stufenweise Aufbau bis zu 16 Voll- und zwei Teilelementen mit insgesamt 2615,66 g U^{235} . Abb. 6 vermittelt eine anschauliche Darstellung des kompakten Kerns, bestehend aus 16 Vollelementen und dem 23 g-Teilelement (links im Vordergrund). Die Sicherheitsstäbe A und B sind eingefahren, das Grobregelelement und das Feinregelelement (verdeckt) sind ausgefahren. Die Po + Be-Quelle (Q) ist im Zentrum des Kerns untergebracht.

In Abb. 7 ist das RCR-m-Diagramm für die anfängliche Annäherung an den kritischen Zustand wiedergegeben. Der unterkritische Zustand ist bekanntlich durch den effektiven Multiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} < 1$ charakterisiert. Für die subkritische Multiplikation gilt ³⁾

Abb. 5



Ladungsschema des kompakten Kerns.

Letzte geladene Brennstoffmenge: 2615,66 g U^{235}

$$\underline{M_C = 2638,4 \pm 0,8 \text{ g } U^{235}}$$

Abb. 6

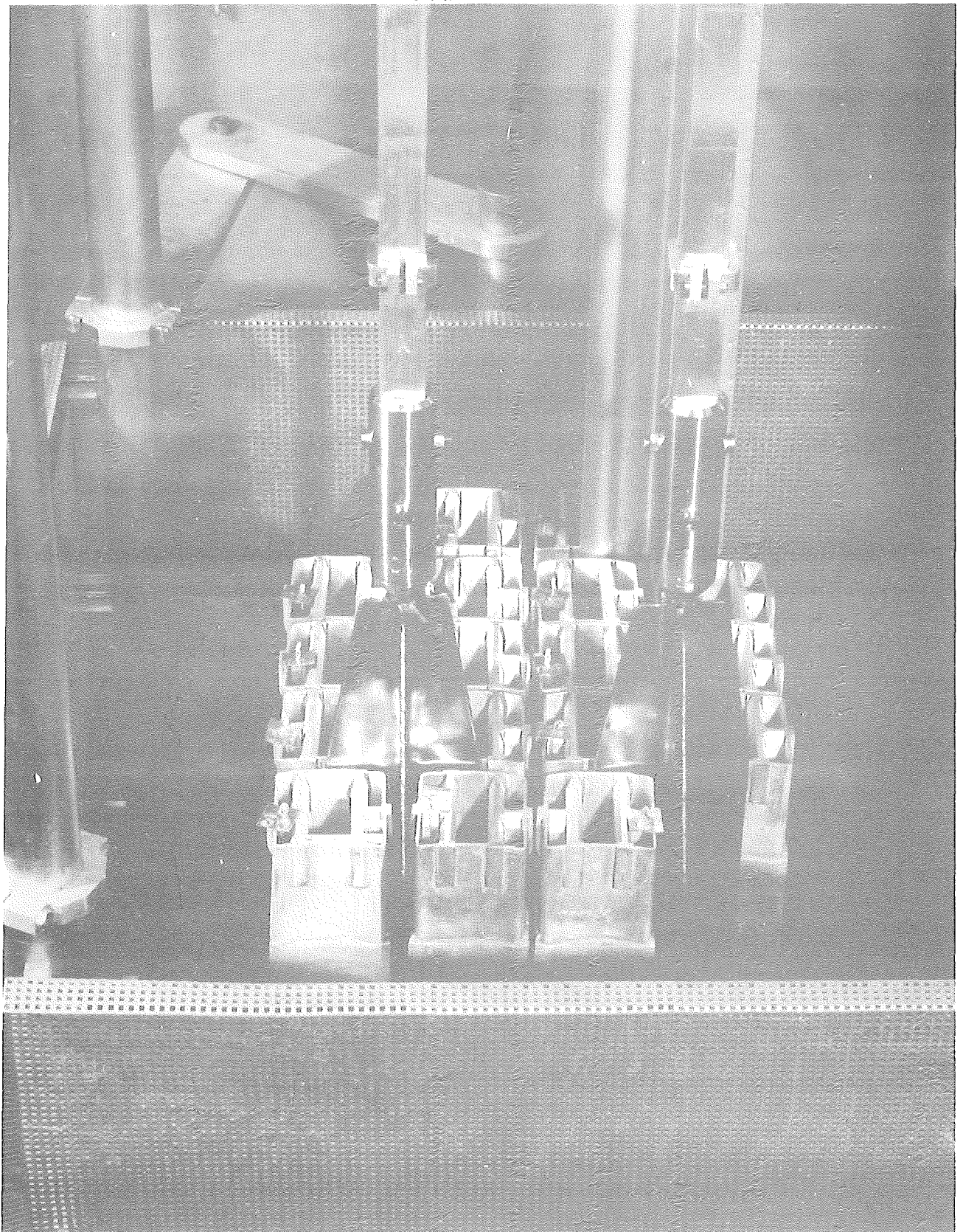
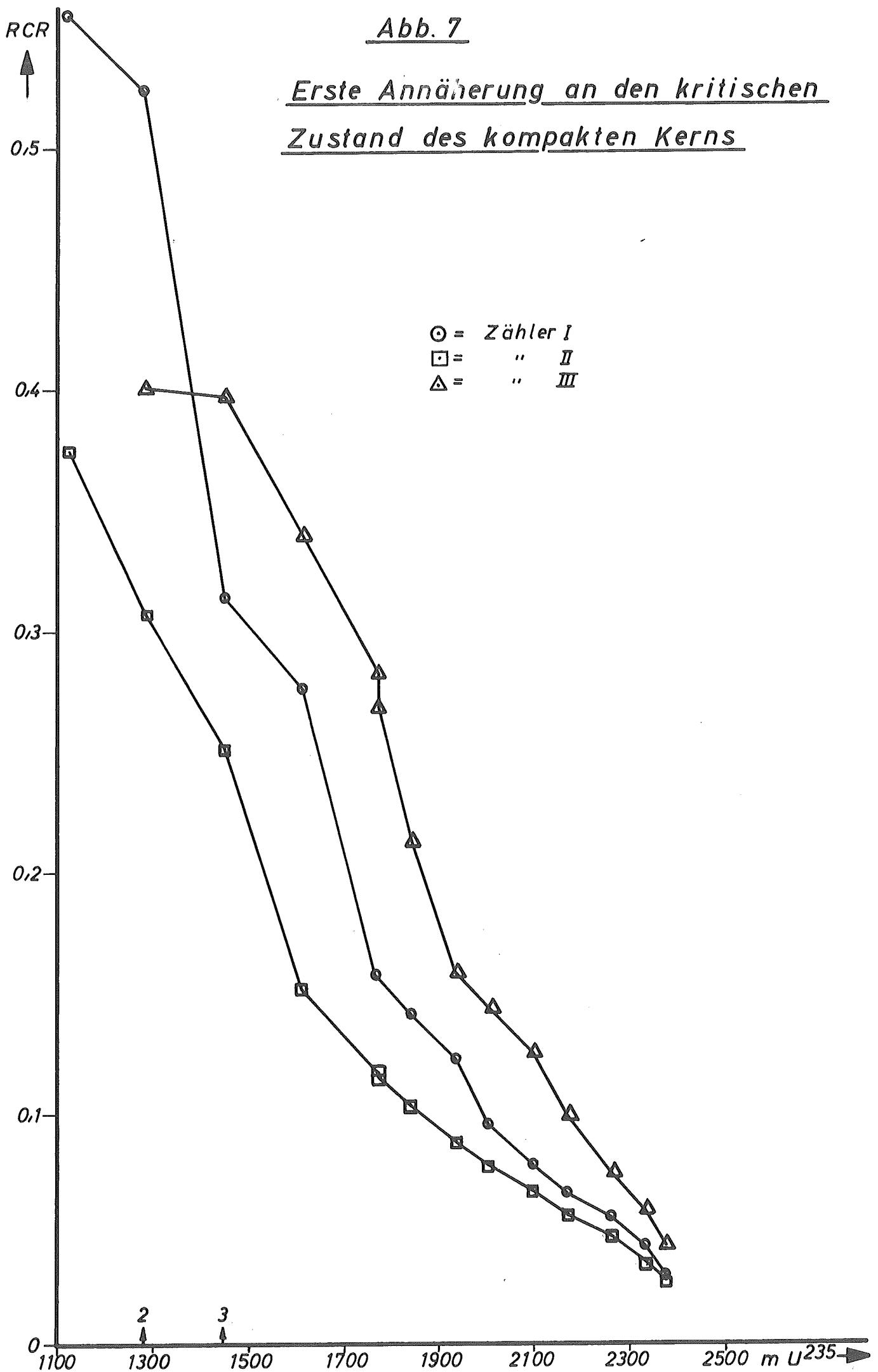


Abb. 7

Erste Annäherung an den kritischen
Zustand des kompakten Kerns



$$M = S (1 + k_{\text{eff}} + k_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^3 \dots) = S \cdot \frac{1}{1 - k_{\text{eff}}}$$

wobei S die Quellstärke bedeutet. Aus dieser Gleichung folgt, daß im Falle geringer Multiplizität, also im Anfangsstadium der Annäherung an den kritischen Zustand, eine große Änderung des Multiplikationsfaktors $-\Delta k_{\text{eff}}$ - nur eine geringe Änderung von M hervorruft. Nähert sich dabei k_{eff} dem Wert 1, so steigt M schon bei kleinen Änderungen von k_{eff} beträchtlich an. Im ersten Fall machen sich die höheren Potenzen der Reihenentwicklung für M bzw. $1/\text{RCR}$ bemerkbar, man erhält daher den hyperbolischen Verlauf für die Kurven der einzelnen Zähler in dem RCR-m-Diagramm der Abb. 7.

Aus der gleichen Abb. läßt sich aber noch eine weitere Tatsache erkennen, die für den Aufbau eines Kernes zu beachten ist: der Geometrieeffekt. Man betrachte die Meßpunkte der drei Zähler in Ladung 2 und Ladung 3. Die letztere ist durch Zufügen eines Vollelementes zu den 8 zuerst eingeladenen Vollelementen der Ladung 2 (vgl. Ladungsschema Abb. 5) entstanden. Offensichtlich hat dieses eine Brennelement praktisch keinen Einfluß auf den gegenüberliegenden Zähler 3, da durch die übrigen Brennelemente eine gewisse Abschirmung hervorgerufen wird. Dagegen ist in Zähler 1 die Multiplikation beträchtlich erhöht worden. In Zähler 2, der zu den beiden Brennelementen fast symmetrisch angeordnet ist, wurde die Zählrate normal erhöht. Dieser sehr deutliche Geometrieeffekt macht sich bei größeren Brennstoffmengen nicht mehr in dem Maße bemerkbar. Dennoch erscheint es ratsam, nach Möglichkeit die Detektoren auf verschiedenen Seiten des Korns anzubringen.

In der Nähe des kritischen Zustandes geht der hyperbolisch erscheinende Zusammenhang zwischen den RCR-Werten und der

U^{235} -Menge in einen linearen über (Abb. 8). Die kritische Masse ergibt sich dann aus der Extrapolation der Geraden mit der Brennstoffachse. Sie beträgt beim kompakten Kern gemäß Ladungsschema Abb. 5

$$\underline{M_c = 2638,4 \pm 0,8 \text{ g } U^{235} \quad 4)}$$

Dieser Wert stellt das Mittel der kritischen Massen dar, die mit Hilfe der 3 BF_3 -Zähler bestimmt worden sind. Die Fehler werden als Abweichungen von der jeweils aus den letzten Messpunkten folgenden mittleren Geraden mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

3.2 Quadratischer Kern

Der kompakte Kern zeichnet sich von allen übrigen denkbaren Kernanordnungen dadurch aus, daß er eine minimale kritische Masse besitzt. Die geometrische Form des o. a. kompakten Kerns macht theoretische Berechnungen schwierig. Es war daher vorgeschlagen worden, einen kompakten Kern mit quadratischer Grundfläche durchzumessen.

Da für eine solche Kernanordnung insgesamt etwa 16 Vollelemente benötigt werden, d. h. 4×4 Brennelemente und der Abstand zwischen Regel- und Sicherheitsstäben nur drei Brennelementlängen umfaßt, so kann man entweder nur die Regelelemente oder nur die Sicherheitselemente rings mit Brennstoff umgeben und so deren volle Wirksamkeit erzielen. Aus Sicherheitsgründen entschied man sich für das Letztere. Das Ladungsschema der letzten Kernladung zeigt Abb. 9. Abb. 10 zeigt das RCR-m-Diagramm mit den letzten Brennstoffzuladungen. Dieses Dia-

Abb. 8

Letzte Annäherung an den kritischen
Zustand des Kerns

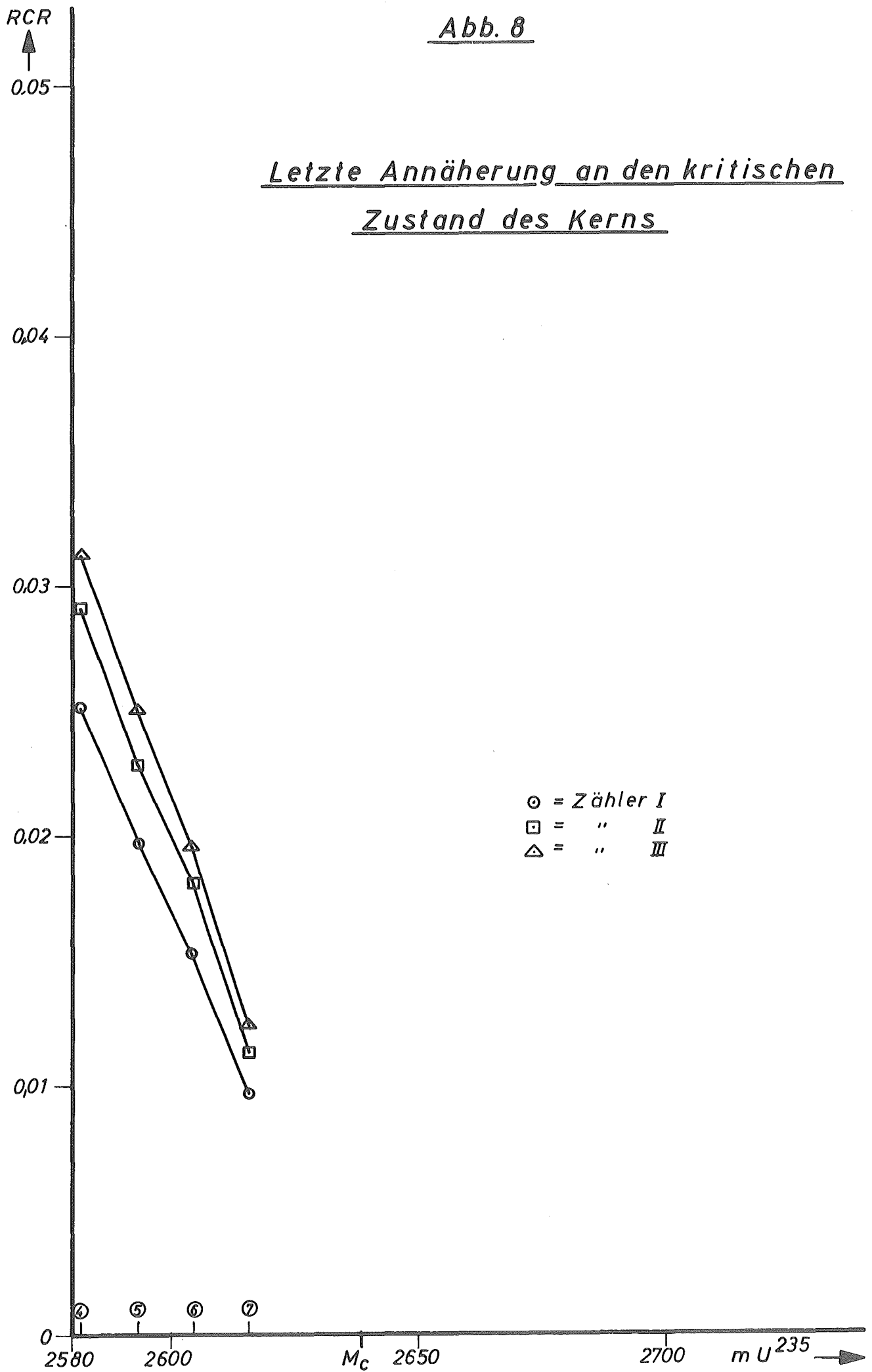
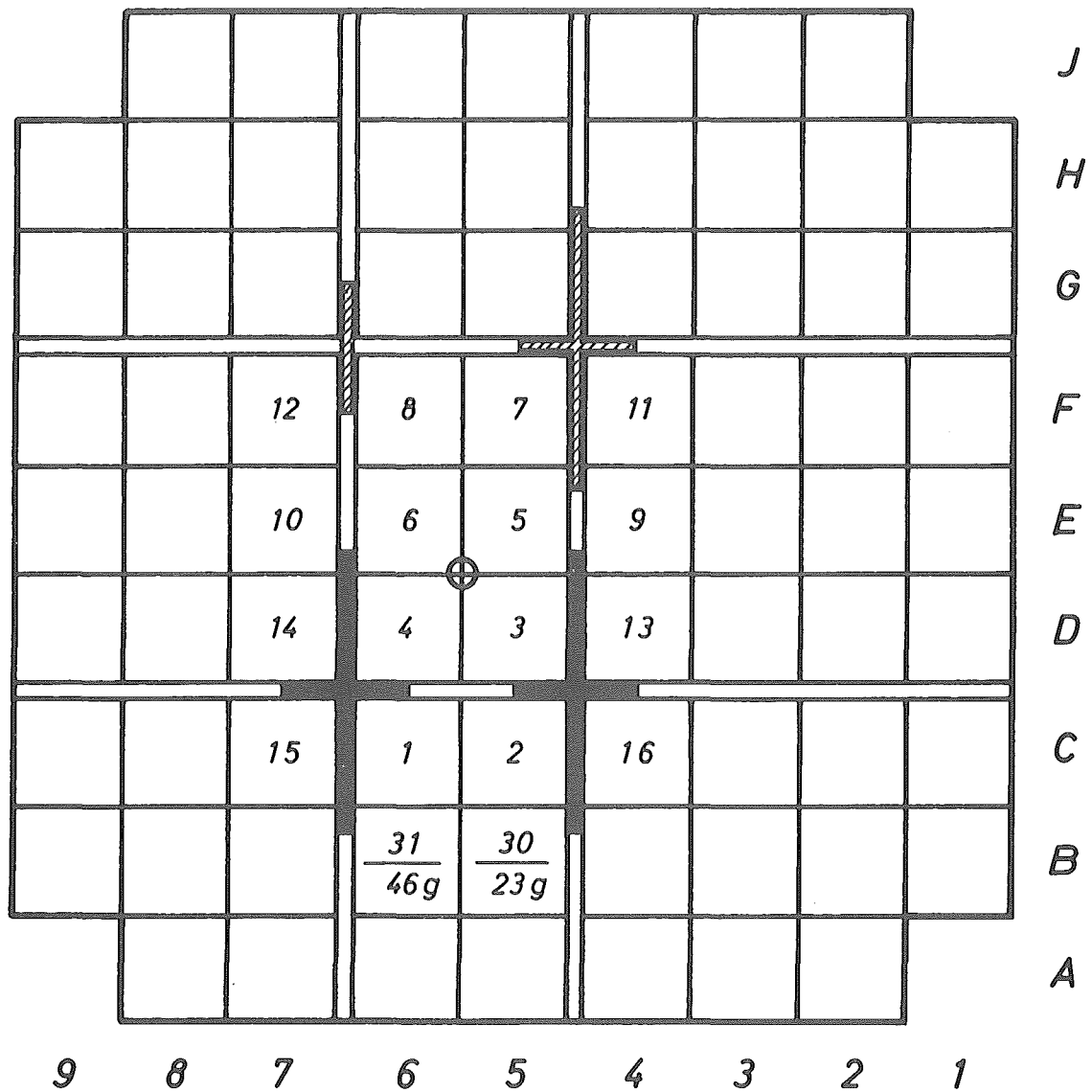


Abb. 9



Ladungsschema des quadratischen Kerns.

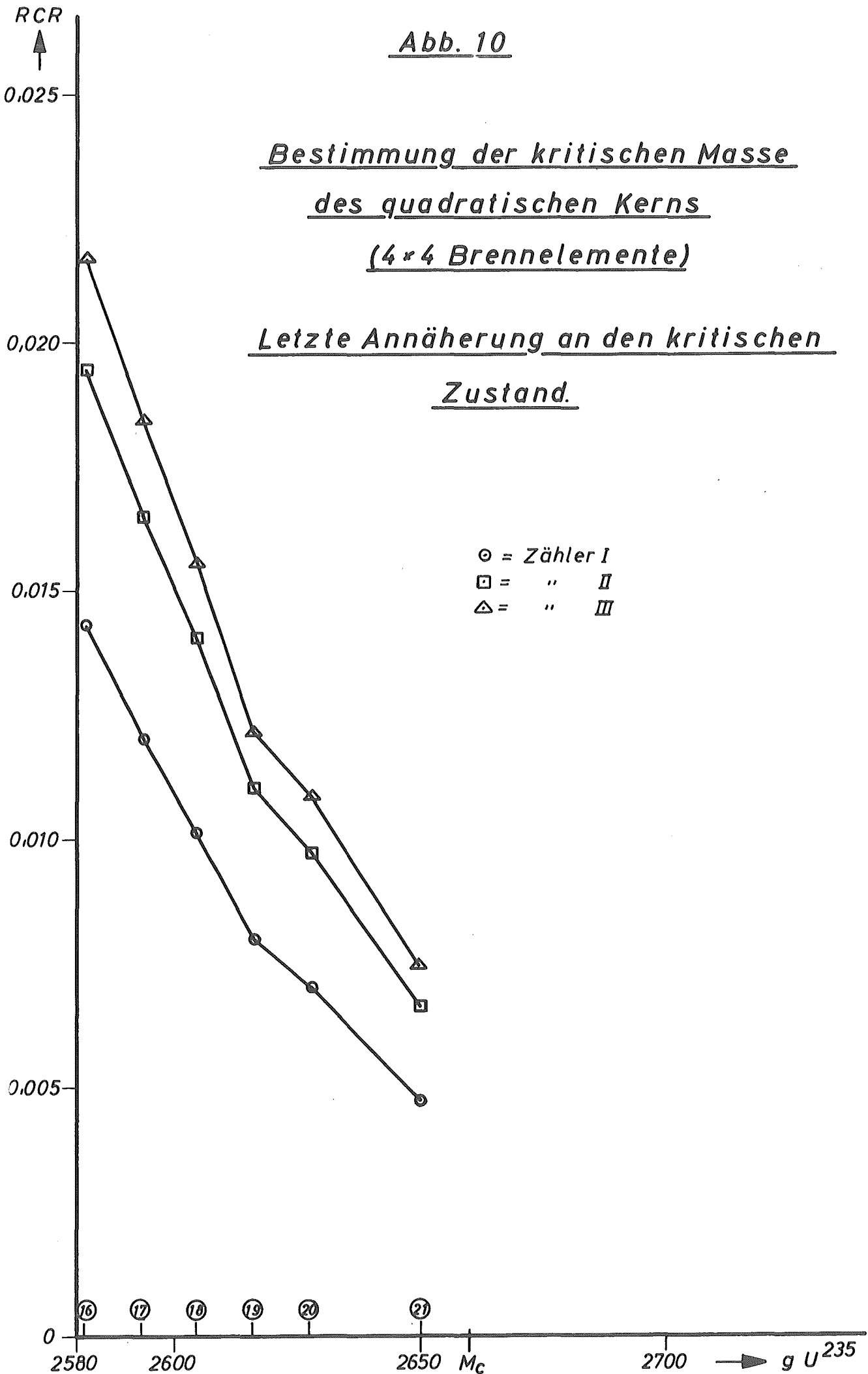
Letzte geladene Brennstoffmenge : 2649,76 g U^{235}

$$\underline{M_C = 2659,9 \pm 0,6 \text{ g } U^{235}}$$

Abb. 10

Bestimmung der kritischen Masse
des quadratischen Kerns
(4x4 Brennelemente)

Letzte Annäherung an den kritischen
Zustand.



gramm erhellt zugleich die Problematik der Annäherung an den kritischen Zustand. Es handelt sich nämlich um die Beiladung von Teilelementen zu den 16 Vollelementen. So sind in Ladung 20 zwei Teilelemente ($23 \pm 11,5$ g) der Ladung 19 durch ein Teilelement von 46 g ersetzt worden. Man erkennt, daß die Neutronenmultiplikation dabei nicht in dem Maße zugenommen hat wie die vorhergehenden Meßpunkte erwarten ließen; die Reaktivitätsänderung, die ein Maß für die Neutronenvervielfachung darstellt, ist bei der Erhöhung der Brennstoffmenge von Ladung 19 auf die beiden Ladungen 20 und 21 etwas kleiner als bei den vorhergehenden Ladungen. Aus den in Abb. 10 wiedergegebenen Geraden kann man somit aus den 4 ersten oder aus den drei letzten Meßpunkten die kritische Masse des Systems ermitteln. Aus Gründen der Sicherheit scheint die Bestimmung der kritischen Masse aus den 4 ersten Meßpunkten gerechtfertigt. Sie beträgt für den quadratischen kompakten Kern

$$\underline{M_c = 2659,9 \pm 0,6 \text{ g U}^{235}}$$

Ein Vergleich der kritischen Massen beider kompakter Kerne - des quadratischen und des o. a. kreuzförmigen - zeigt, daß zur Kritikalität des ersten mindestens 21,5 g mehr U^{235} benötigt werden als beim zweiten. Von diesem Standpunkt aus ist die Bezeichnung kompakter Kern für diese kreuzförmige Anordnung gerechtfertigt.

Der Unterschied dürfte darauf beruhen, daß beim kompakten Kern die Zylindergeometrie besser angenähert wird als beim quadratischen Kern. Insbesondere treten beim letzteren größere Leckverluste von Neutronen an den Ecken auf, was sich auf die Neutronenökonomie auswirkt. Dagegen besteht für die an den Ecken des

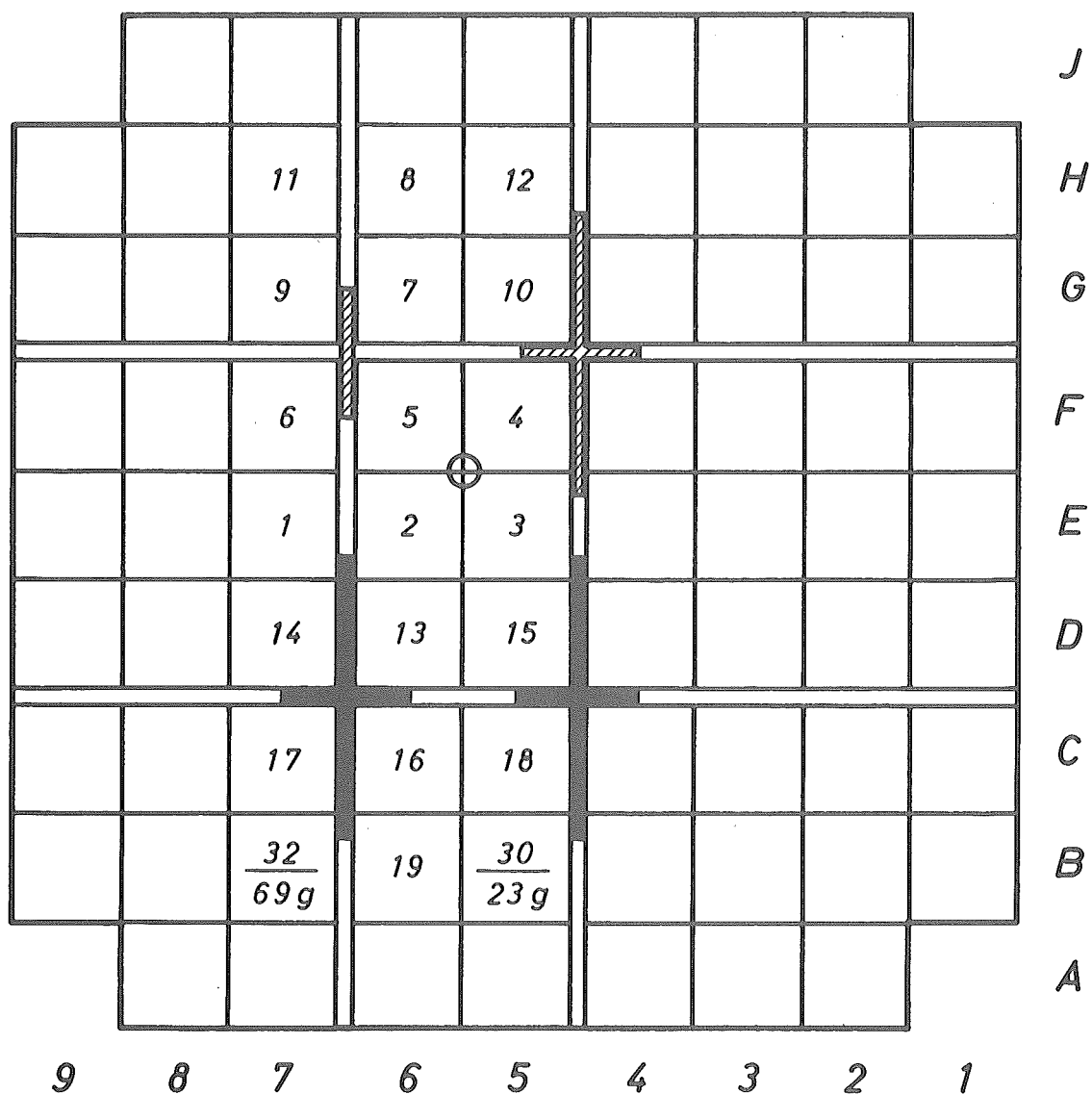
kompakten Kerns entweichenden Neutronen eine gewisse Wahrscheinlichkeit, doch noch Spaltungen an den angrenzenden Brennelementen zu erzeugen. Andererseits dürfte der Wasserspalt, der für die Aufnahme der Regelelemente vorgesehen ist, noch einen Einfluß auf die Neutronenbilanz machen. Im Falle des quadratischen Kerns liegt dieser Spalt außerhalb der Kernfiguration (vgl. Abb. 5 und 9).

3.3 Länglicher Kern

Diese Kernanordnung besitzt eine Breite von drei Brennelementlängen. Da die Gitterplatte maximal mit $7 \times 7 = 49$ Brennelementen besetzt werden kann, ist für den länglichen Kern eine maximale Ladung von $3 \times 7 = 21$ Brennelementen möglich. Das Ladungsschema der zuletzt geladenen Brennstoffmenge in dieser Kernanordnung zeigt Abb. 11. Aufgrund einer solchen Anordnung dürfte in den thermischen Säulen ein hoher, wenn auch räumlich ziemlich begrenzter Fluß zu erwarten sein.

Da in der subkritischen Anlage - entsprechend natürlich auch im Reaktor selbst - die Anordnung der Regel- und Sicherheitselemente bezüglich der Gitterplatte fest vorgegeben ist, erhebt sich die Frage, ob es zweckmäßig sei, den Kern analog Abb. 11 aufzubauen, so daß das Feinregelement möglichst wirksam sei, oder ob der Kern um eine Reihe nach rechts verschoben aufzubauen sei. (Zur Illustration siehe Abb. 12.) Im letzteren Fall nämlich besäße das Grobregelement infolge der allseitigen Umgebung mit Brennstoff eine maximale Wirksamkeit. - Aus betrieblichen Gründen entschied man sich für den Aufbau gemäß Abb. 11; denn es ist sicherlich bequemer für den Reaktoroperator, einen bestimmten Sollwert an Leistung einzuhalten, wenn das Feinregelement, das überdies im Reaktor noch mit zwei verschiedenen

Abb. 11



Ladungsschema des länglichen Kerns.

Letzte geladene Brennstoffmenge: 3156 g U²³⁵

$$\underline{M_C = 3205,3 \pm 2,4 \text{ g U}^{235}}$$

Abb.12

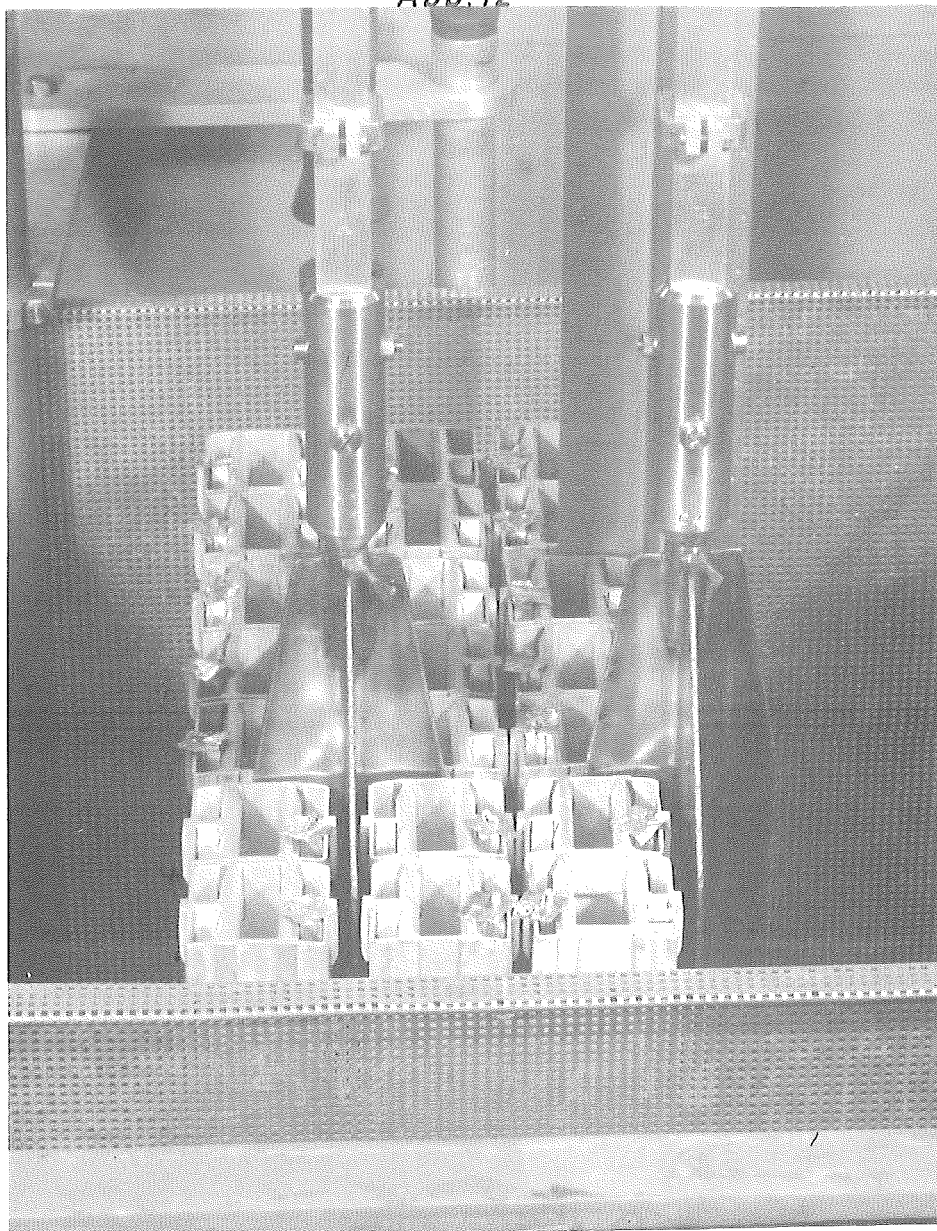
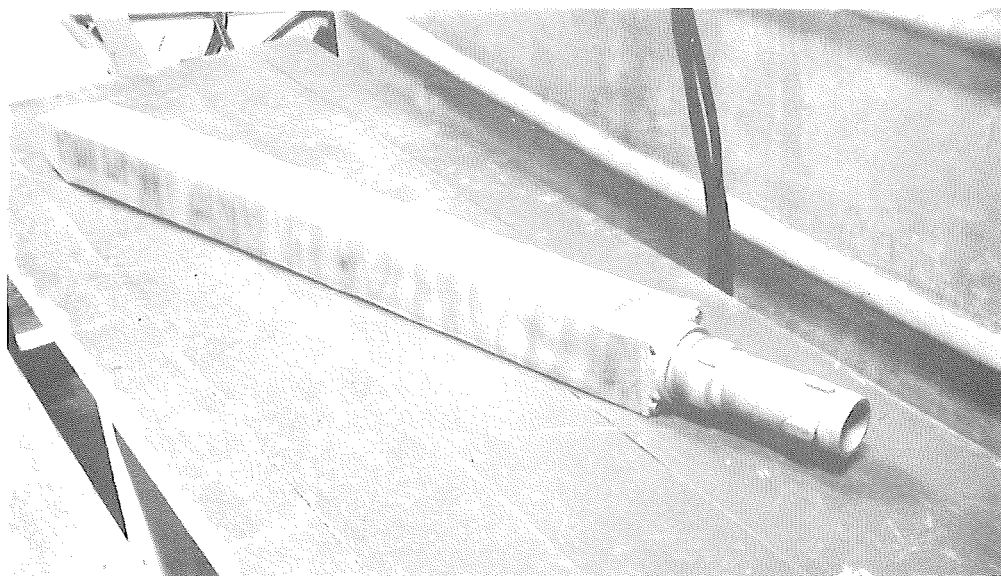


Abb.13



Geschwindigkeiten ein- und ausgefahren werden kann, eine höhere Wirksamkeit in der Reaktivitätskontrolle besitzt. Andernfalls würde das Grobregелеlement bereits bei sehr kleinen Veränderungen der Eintauchtiefen eine große Reaktivität kompensieren.

Aus dem RCR-m-Diagramm, das analog Abb. 7 oder 8 ist, konnte die kritische Masse zu

$$\underline{M_c = 3205,3 \pm 2,4 \text{ g U}^{235}}$$

ermittelt werden.

Kernanordnungen mit fehlendem zentralen Brennelement

Bekanntlich besitzt der Reaktor im Kernzentrum den maximalen schnellen und auch thermischen Fluß. Es liegt daher nahe, diese Stellen für besondere Bestrahlungsexperimente auszunutzen. Dazu muß das zentrale Brennelement aus der Kernanordnung herausgenommen werden. Die so entstehende Leerstelle (Void) kann entweder mit Luft oder mit Wasser ausgefüllt werden.

3.4.1 Kern mit zentralem 3" x 3" Luftvoid

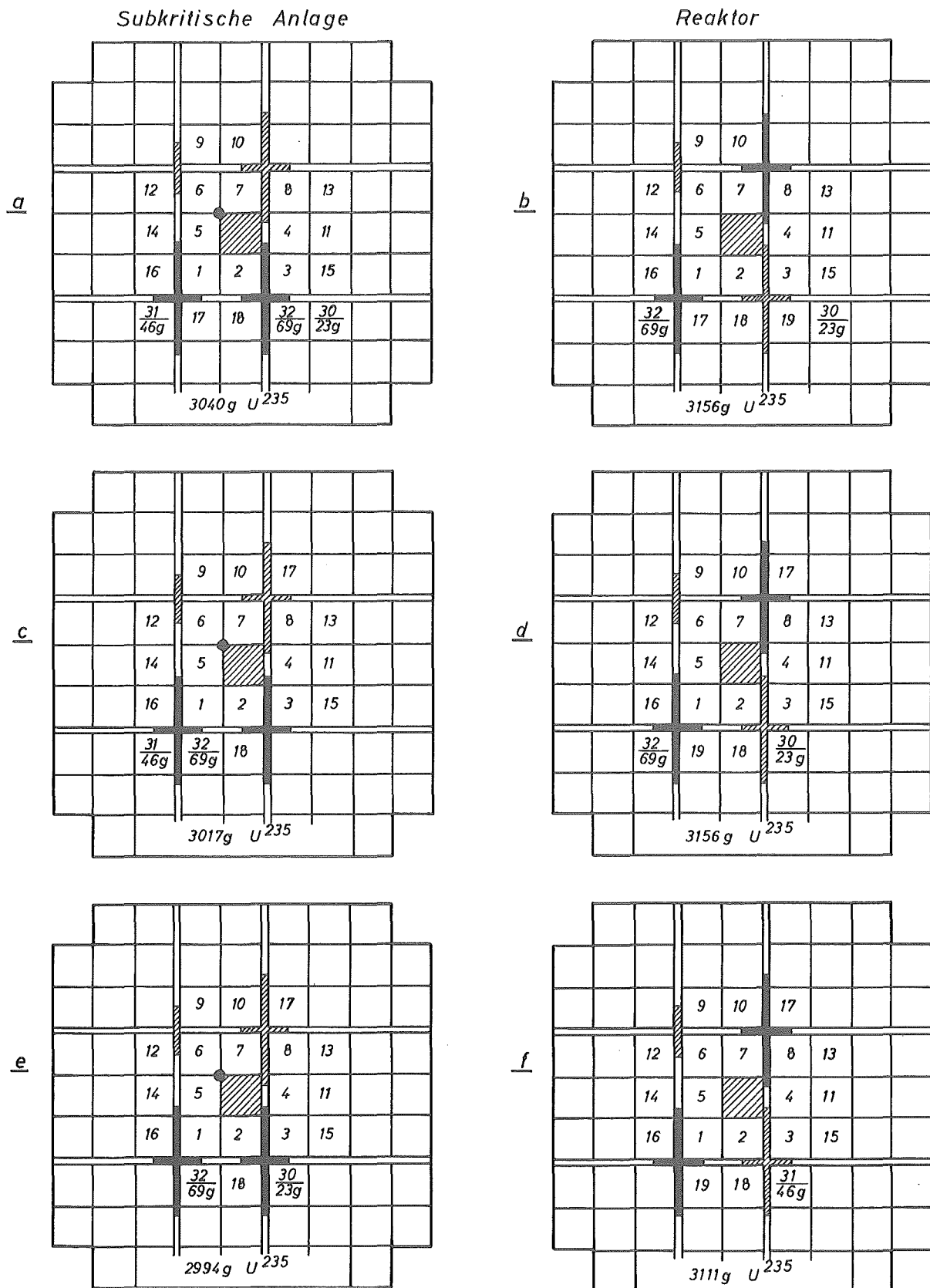
Ein solches Luftvoid wird erzeugt durch den Ersatz des Brennelementes durch einen mit Luft gefüllten Aluminiumkasten von der Größe eines Brennelementes (3" x 3"). (Siehe dazu Abb. 13.) Um den Auftrieb zu vermeiden, wurde dieser Kasten mit einem schweren Gewicht versehen, das oben aufgeschraubt werden konnte. Vor der Verwendung in den Kerntank wurde er sorgfältig auf seine Wasserdichtigkeit geprüft.

Der Aufbau eines solchen Kernes birgt verschiedene Schwierigkeiten in sich, die einmal durch die Forderung nach maximaler Sicherheit und zum andern durch die unterschiedliche Anordnung der Regel- und Sicherheitselemente in der subkritischen Anlage gegenüber dem Reaktor hervorgerufen werden. Sie sollen anhand der Abb. 14 erläutert werden. Diese Abb. zeigt verschiedene Kernladungsschemata, bezogen auf die Verhältnisse in der subkritischen Anlage bzw. im Reaktor. (Das Luftvoid ist jeweils durch ein schraffiertes Viereck angedeutet.) Die Kernanordnung der Abb. 14a bietet für die subkritische Anlage maximale Sicherheit, da die Sicherheitselemente weitgehend von Brennstoff umgeben sind. Es wurden dazu etwa 3040 g in den Kerntank geladen. Die kritische Masse konnte aus dem RCR-m-Diagramm zu

$$\underline{M_c = 3096,3 \pm 3,7 \text{ g U}^{235}}$$

ermittelt werden. Vom Standpunkt des Reaktors ist eine solche Anordnung jedoch nicht sehr günstig. Denn legt man beispielsweise für den Betrieb des Reaktors eine Überschußreaktivität von 0,5 % zugrunde, was etwa 65 g Brennstoff entspricht, so würde der Arbeitskern ca. 3161 g U^{235} enthalten, also ca. 19 Vollelemente und 2 Teilelemente (23 g und 69 g) mit zusammen etwa 3156 g. Abb. 14b zeigt einen derartigen Kern. Dabei ist das Grobregelelement wirksamer als jedes der beiden Sicherheitselemente. Diese Tatsache ist vom Sicherheitsstandpunkt nicht zu befürworten. Man wird daher versuchen, wenigstens ein Sicherheitselement maximal wirksam zu machen, indem man ein weiteres Vollelement in seine Umgebung bringt, d. h. Brennelement Nr. 17 in Abb. 14c und Abb. 14d. Teilelemente können nicht an dieser Seite des Kernels angebaut werden, da dann an dieser Stelle ein Wasservoid entstünde, das eine höhere kritische Masse vor-

Abb. 14



Ladungsschemata von Kernen mit zentralem 3'x3" Luftvoid

täuscht; denn die Teilelemente besitzen nur Brennstoffplatten an der Seite des Aluminiumgehäuses, die in Richtung der konvexen Krümmung der Brennstoffplatten weist. Abb. 14 c zeigt eine solche Kernanordnung in der subkritischen Anlage. Die zuletzt geladene Brennstoffmenge beträgt 3017 g. Die kritische Masse konnte in dieser Anordnung zu

$$\underline{M_c = 3088,5 \pm 4,0 \text{ g U}^{235}}$$

bestimmt werden. Im Gegensatz zur unterkritischen Anlage ist eine derartige Anordnung für den Reaktorbetrieb weit sicherer (s. Abb. 14d) - Der Kernaufbau der Abb. 14 c hat aber den Nachteil, daß sehr viele Neutronen durch Leckverluste verloren gehen, d. h. die kritische Masse liegt entsprechend hoch. Um diesen Umstand abzuschaffen, gleichzeitig aber auch noch möglichst große Sicherheit zu erhalten, wurde letztlich ein Kern gemäß dem Schema der Abb. 14 e aufgebaut. Die maximal zulässige Brennstoffladung beträgt hierbei etwa 2994 g und die kritische Masse beläuft sich auf

$$\underline{M_c = 3038,7 \pm 5,2 \text{ g U}^{235}}$$

Der Unterschied in den kritischen Massen beträgt also maximal etwa 58 g. Legt man wieder eine Überschußladung von 65 g für den Reaktorbetrieb zugrunde, so enthält der Arbeitskern etwa 3111 g Brennstoff, was durch 19 Vollelemente und einem Teilelement von 46 g verifiziert werden kann gemäß Abb. 14 f. Eine solche Kernanordnung ist auch vom Sicherheitsstandpunkt aus zu empfehlen.

Diese Ausführungen sollen zeigen, wie sehr die kritische Masse

vom Aufbau des Kerns abhängt.

3.4.2 Kern mit zentralem 3" x 3" Wasservoid

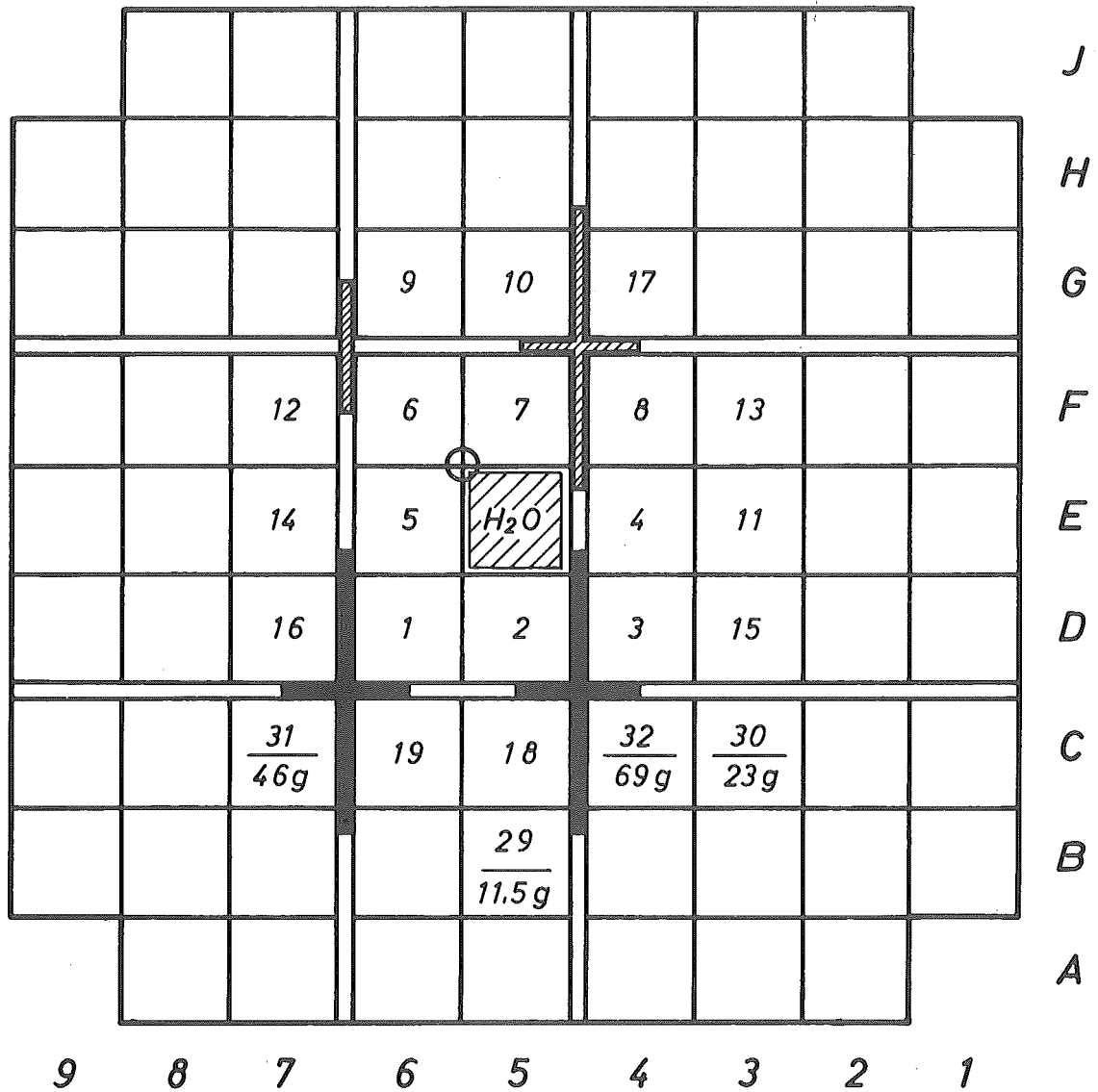
Beim Einbau eines zentralen Luftvoids erhebt sich sogleich die Frage nach dem Verhalten des Reaktors bei einem plötzlichen Wassereinbruch. In dem zusätzlichen Programm für die unterkritischen Versuche war daher u. a. die Bestimmung der kritischen Masse eines Kerns mit zentralem Wasservoid von der Größe eines Brennelementes gefordert - der andere Extremfall eines Voids. In der Praxis wird dieser Fall lediglich durch die Wegnahme des betreffenden Brennelementes erreicht. Abb. 15 zeigt das Ladungsschema der letzten Kernladung. Aus dem RCR-m-Diagramm ergibt sich für eine solche Kernanordnung eine kritische Masse zu

$$\underline{M_c = 3255,0 \pm 2,0 \text{ g U}^{235}}$$

Diese hat also im Vergleich zu der des zentralen Luftvoids um etwa 216 g U²³⁵ zugenommen, so daß beim Fluten des Luftvoids ein Absinken der Reaktivität hervorgerufen wird. Dieses Verhalten ist für die Sicherheit des Reaktorbetriebes von großer Wichtigkeit.

Ein langsames Ansteigen der Wassersäule hat in sehr niedrigen Höhen eine sehr geringe Reaktivitätszunahme (ca. 0,1 %) zur Folge, wie unterkritische Messungen gezeigt haben ⁵⁾. Bei weiterem Ansteigen sinkt die Reaktivität aber stark ab (s. o.).

Abb. 15



Ladungsschema des Kerns mit zentralem 3" x 3" Wasservoid.

Letzte geladene Brennstoffmenge: 3213,33 g U²³⁵

$$\underline{M_C = 3255,0 \pm 2,0 \text{ g U}^{235}}$$

3.5 Kern mit 4 fehlenden zentralen Brennelementen

Für den Einbau größerer Experimente in das Zentrum des Kerns dürfte u. U. eine Leerstelle, die durch die Entfernung eines Brennelementes entstanden ist, nicht ausreichen. Es war daher vorgeschlagen worden, einen Kern mit einem großen Luftvoid auszumessen. Zur Herstellung dieses Luftvoids wurden 4 zentrale Brennelemente durch luftdichte Aluminiumkästen ersetzt. (s. Abb. 16) Das so entstehende Void hat einen Querschnitt von 6" x 6" (ca. 15 x 15 cm). Man kann sich vorstellen, daß bei solchen Dimensionen die Neutronenflüsse in dem Void durch Leckverluste der Neutronen sehr stark absinken. Abb. 17 zeigt das Schema der zuletzt geladenen Kernanordnung. Die Neutronenquelle befindet sich im Zentrum des Luftvoids. In Abb. 18 ist das RCR-m-Diagramm wiedergegeben. Man beobachtet wieder den Effekt, daß beim Ersatz mehrerer Teilelemente durch ein Vollelement die Reaktivität abnimmt, obwohl die geladene Brennstoffmenge zugenommen hat. Daß ein Meßpunkt von Zähler 2 nicht auf der Geraden liegt, hat seinen Grund darin, daß bei diesen Impulsraten die Zählgeschwindigkeit der elektromagnetischen Zählwerke nicht ausreicht. Er wurde nicht zur Bestimmung der kritischen Masse herangezogen. Diese beträgt

$$\underline{M_c = 4115,6 \pm 1,9 \text{ g U}^{235}}$$

Gegenüber dem kleinen Luftvoid hat sie also um ca. 1077 g und gegenüber dem kompakten Kern gar um 1477 g U^{235} zugenommen. Bei einer Vergrößerung des Querschnitts - oder was dasselbe bedeutet: des Volumens - des Voids hat also die Reaktivität beträchtlich abgenommen (vergl. dazu auch 5.) -

3.6 U-förmiger Kern

Läßt man theoretisch an der Kernanordnung mit einem Void die eine Seite dieses Voids mit Brennelementen unbesetzt, so erhält man einen U- oder einen C-Kern, je nachdem welche Seite offen bleibt. Man erhält so einen Kern mit einer relativ großen Oberfläche. Das ist sehr günstig für Bestrahlungsexperimente in den Experimentierkanälen. Überdies hat diese Kernanordnung den Vorteil, daß man ein relativ großes Gebiet hohen Neutronenflusses zwischen den beiden Schenkeln des U und an der offenen Seite des Kerns zur Verfügung hat. Das Ladungsschema der zuletzt durchgeführten Kernbeladung zeigt Abb. 19. In dieser Anordnung sind insgesamt 21 Vollelemente und ein Teilelement (11,5 g) mit insgesamt 3400,78 g U^{235} eingebaut. Aus dem RCR-m-Diagramm konnte die kritische Masse zu

$$\underline{M_c = 3434,6 \pm 0,6 \text{ g } U^{235}}$$

bestimmt werden. Vergleichsweise mit dem Kern mit dem großen Luftvoid ist also beim U-Kern die kritische Masse 681 g U^{235} niedriger.

Dieser U-Kern gemäß Abb. 19 dürfte aber für den Einbau von Experimenten durch die Anordnung der Regel- bzw. Sicherheitselemente etwas nachteilig sein. Es wurde daher vorgeschlagen diese Kernanordnung um 90° zu drehen (Abb. 20), wodurch ein C-Kern entsteht. Für diesen Kern würde schätzungsweise die gleiche kritische Masse benötigt; leider konnte er aus Zeitmangel nicht durchgemessen werden.

Abb.16

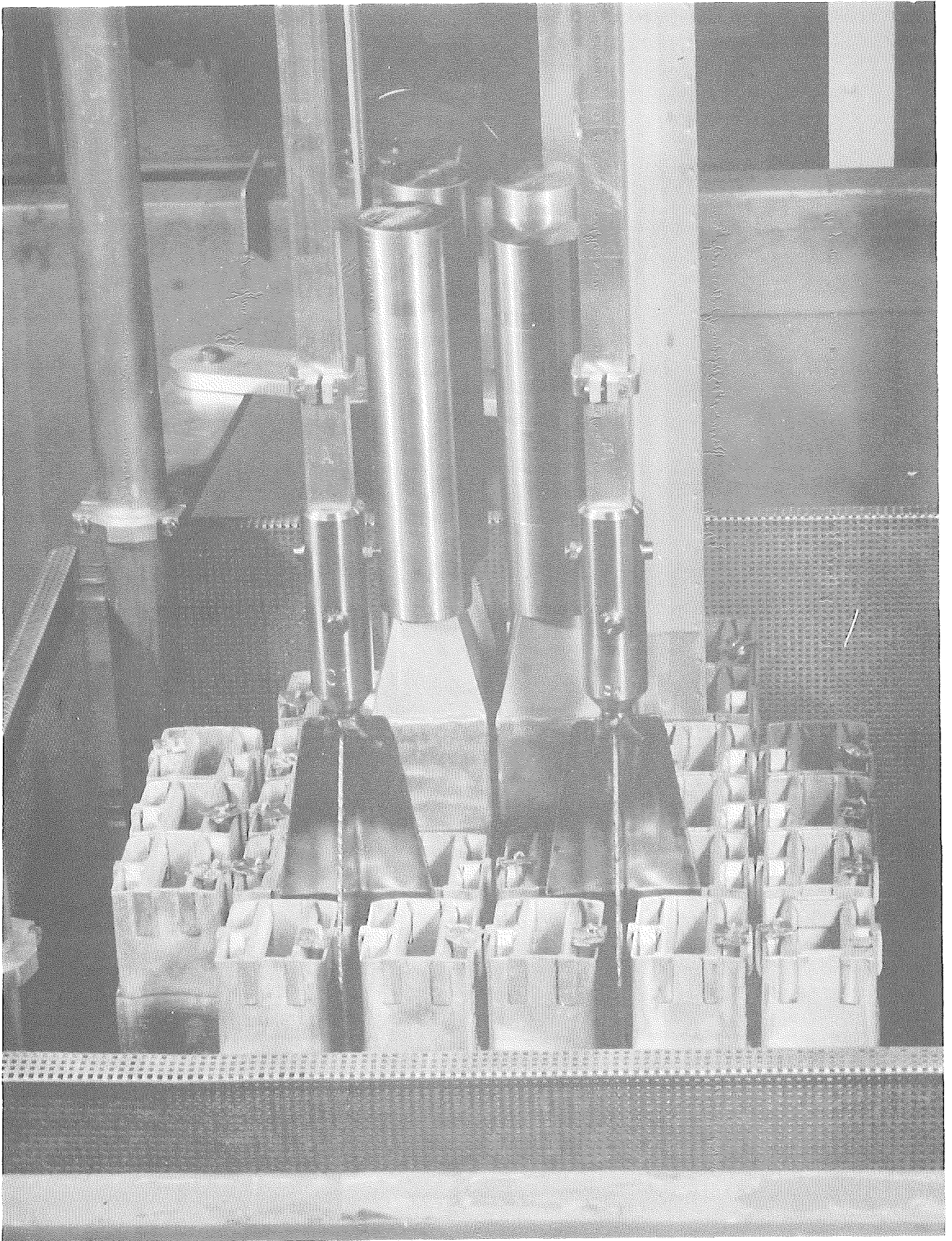
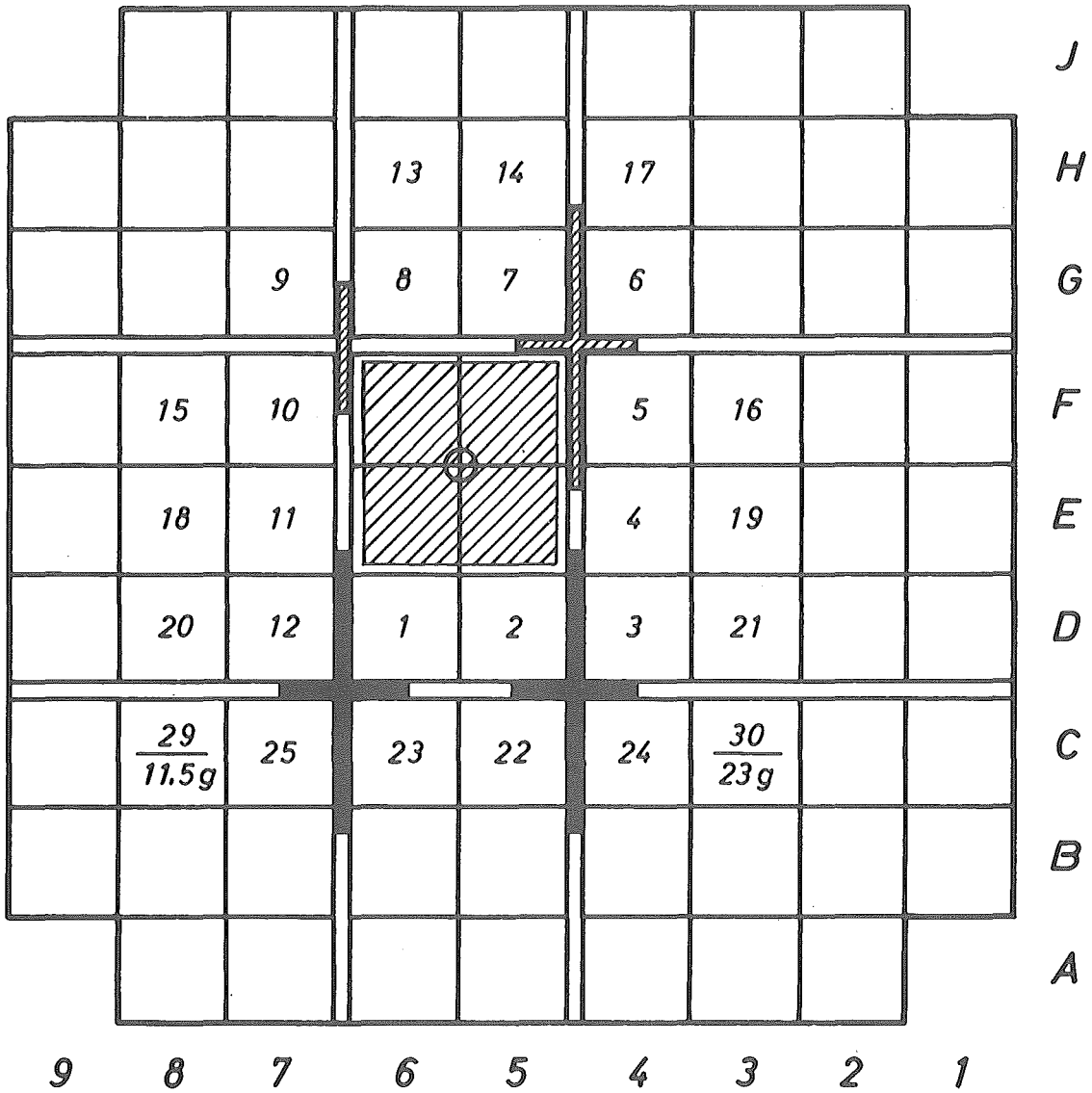


Abb. 17

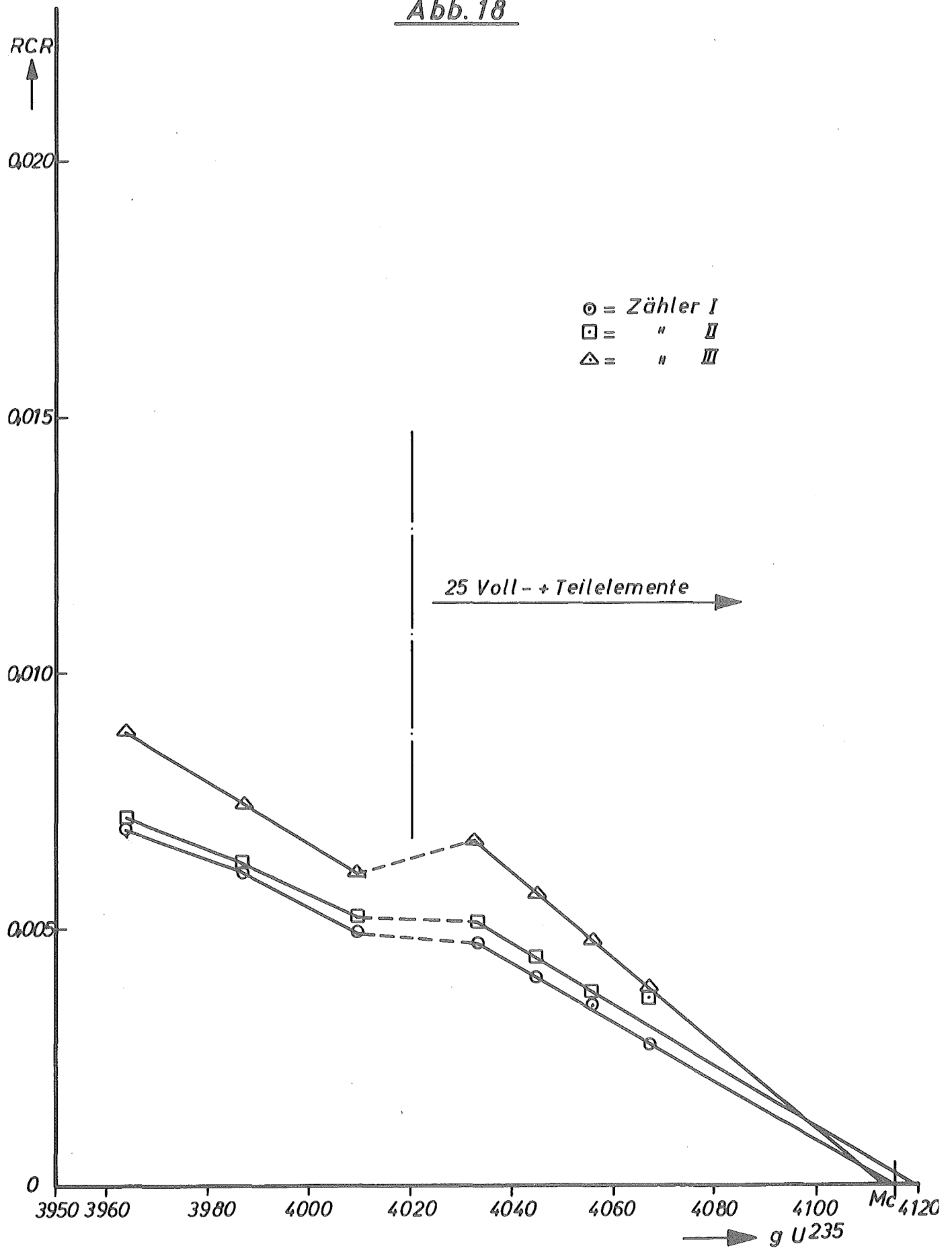


Ladungsschema des Kerns mit zentralem 6" x 6"-Luftvoid.

Letzte geladene Brennstoffmenge : 4067 g U²³⁵

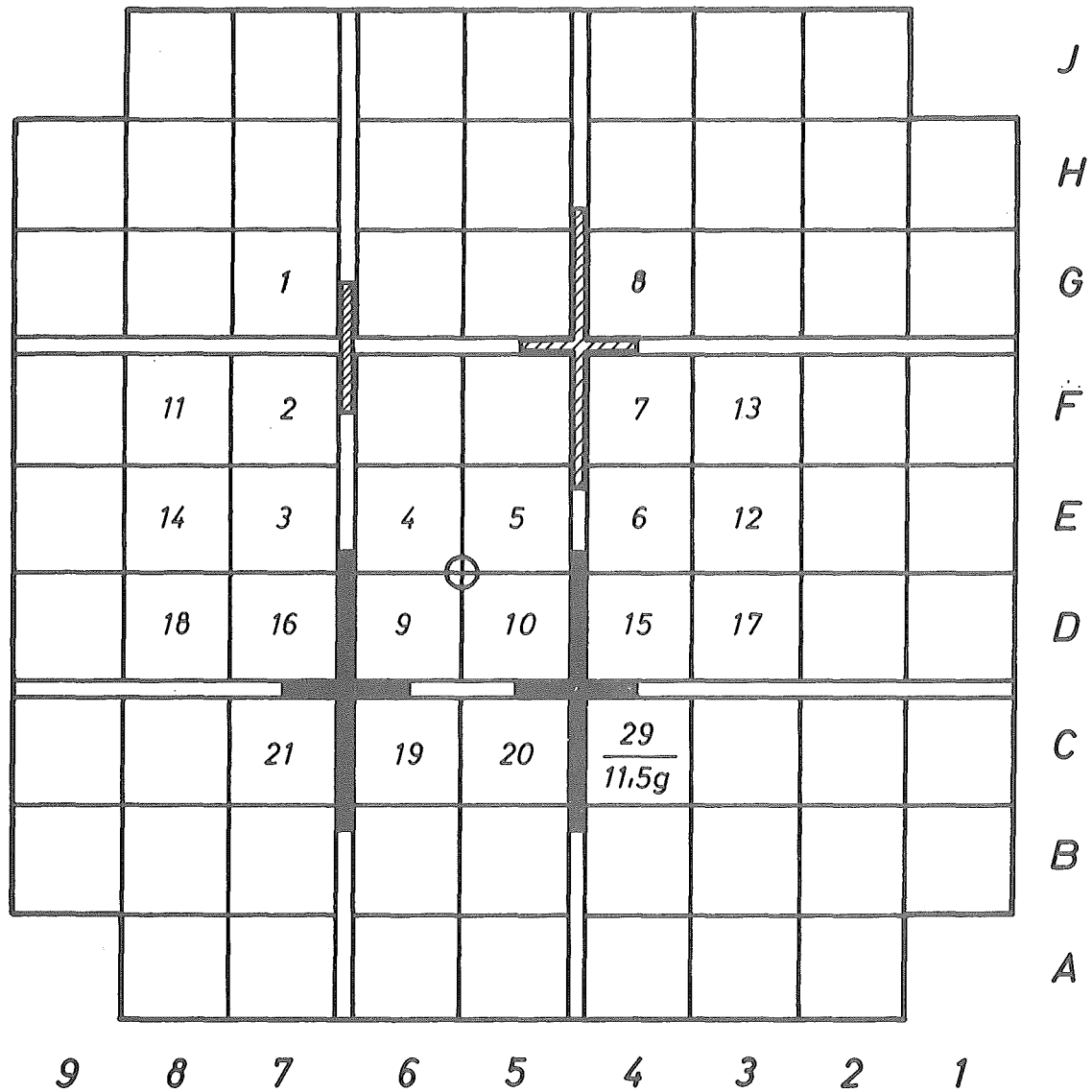
$$M_C = 4115.61 \text{ g } U^{235}$$

Abb. 18



Annäherung an den kritischen Zustand bei einem Kern
mit zentralem 6"×6" Luftvoid.

Abb. 19

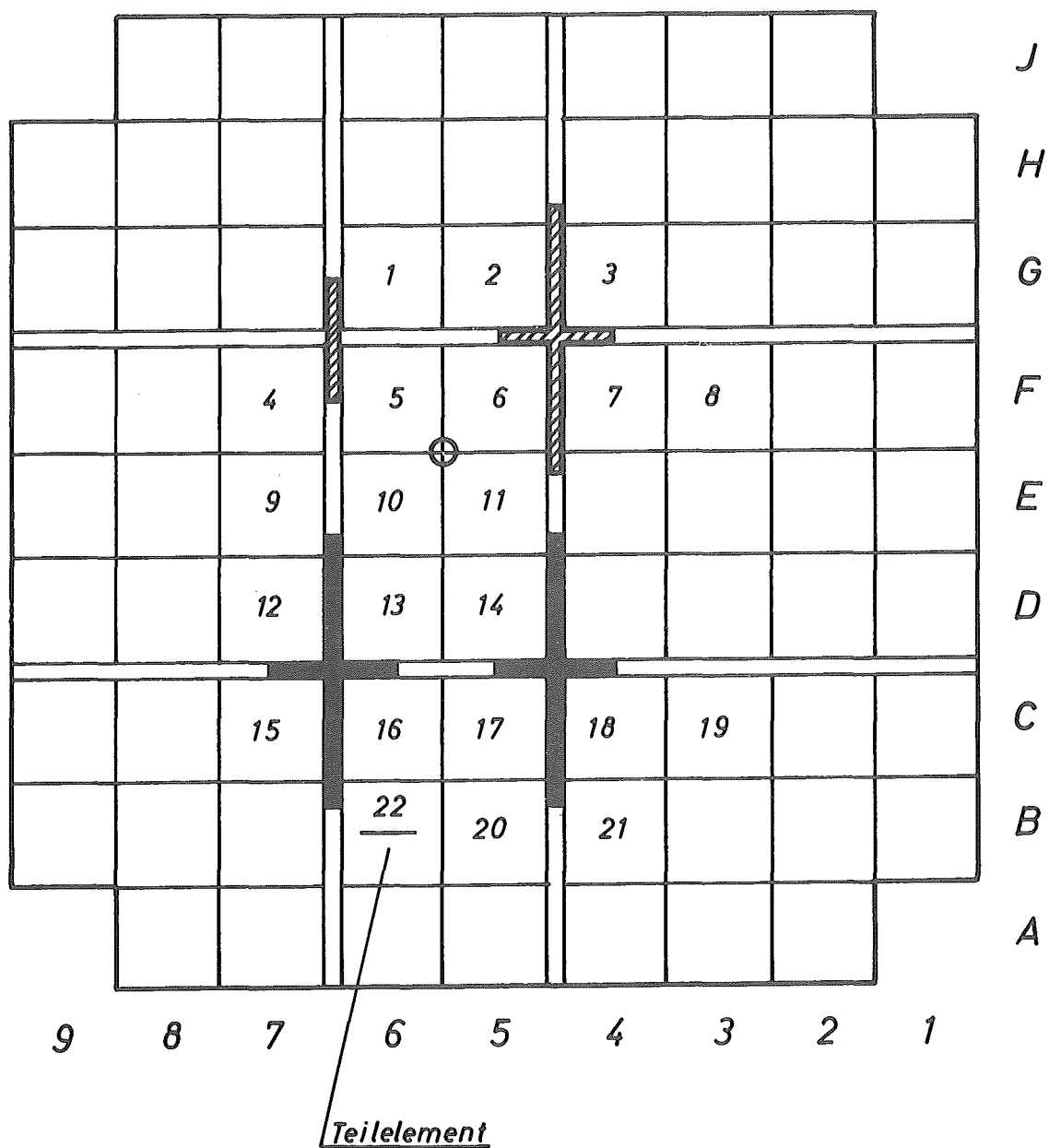


Ladungsschema eines U-Kerns.

Letzte geladene Brennstoffmenge: 3400.78 g U²³⁵

$$\underline{M_C = 3434,6 \pm 0,6 \text{ g U}^{235}}$$

Abb. 20



Vorgeschlagene Anordnung eines C-Kerns

4. Bestimmung des Wertes der Regelemente

In all den obigen Kernanordnungen wird die kritische Masse bei völlig ausgefahrenen Sicherheits- und Regelementen bestimmt. Für den Betrieb und nicht zuletzt für die Sicherheit des Reaktors ist es außerordentlich wichtig zu wissen, welche Wirksamkeit ('Wert') das Fein- oder das Grobregelement in der betreffenden Kernanordnung besitzt. Dieser Wert kann in der subkritischen Anlage in der Weise ermittelt werden, daß bei eingefahrenem Regelement die kritische Masse bestimmt wird und von dieser die kritische Masse bei ausgefahrenem Regelement abgezogen wird. Der Wert ergibt sich also bei dem unterkritischen Verfahren in g U²³⁵. In der Praxis ist es aber üblich, den Wert des Regelementes in % Reaktivität anzugeben. Man benötigt somit einen Umrechnungsfaktor, der es erlaubt, die aus den unterkritischen Versuchen folgende Brennstoffmengendifferenz in % Reaktivität umzurechnen. Dies ist möglich nach einer von Dr. P.N. Cooper angegebenen Methode ⁷⁾. (s. Anhang) Es gilt zwischen der Brennstoffmenge und der ihr entsprechenden Reaktivität die Beziehung

$$\frac{\delta k_e}{k_e} = \frac{1}{C} \frac{\delta m}{m_c} \times 100 \%$$

wobei k_e die effektive Multiplikationskonstante, m_c die kritische Masse bei volleingefahrenem Regelement und δm die Änderung der kritischen Massen in den beiden Extremalstellungen der Regelemente bedeuten.

Lt. Programm für die unterkritischen Versuche sollte der Wert der Regelemente für folgende Kernfigurationen bestimmt werden:

Kompakter Kern	C	=	4,4
Länglicher Kern	C	=	7,8
Kern mit zentralem 3" x 3" Luftvoid	C	=	4,5
Kern mit zentralem 6" x 6" Luftvoid	C	=	6,2

Die hier angegebenen Umrechnungsfaktoren C zur Ermittlung der Reaktivität der Regelelemente wurden für die verschiedenen Kernanordnungen nach der oben erwähnten Methode berechnet.

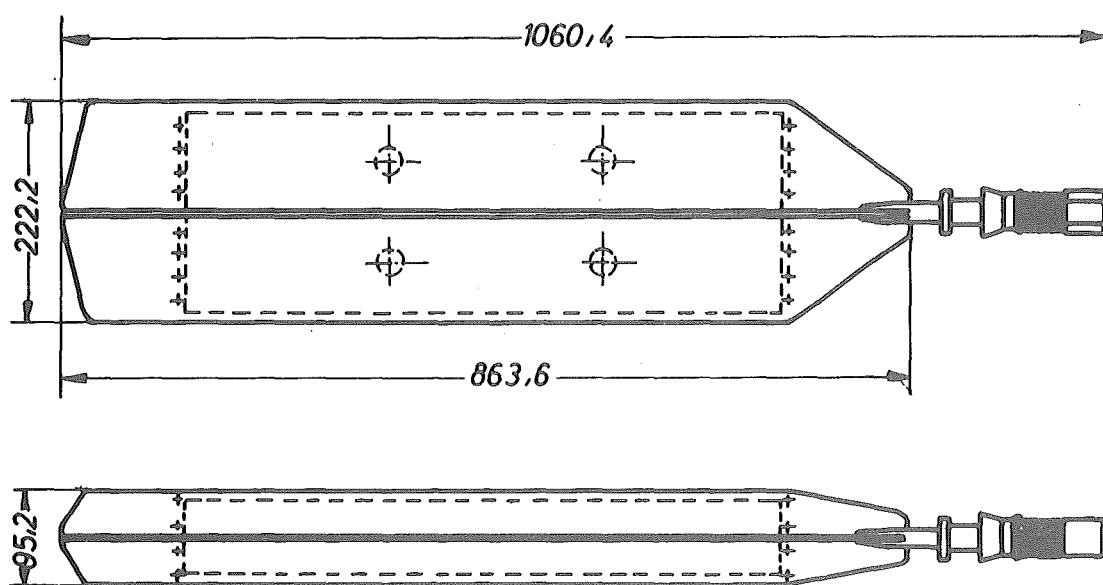
In diesem Zusammenhang sei noch einmal daran erinnert, daß das Feinregelelement aus einem Blatt aus rostfreiem Stahl von ca. 81 cm Länge, 0,5 cm Dicke und 7 cm Breite besteht. Das Grobregelelement hingegen besteht aus drei mit rostfreiem Stahl überzogenen Cadmiumblättern von ca. 63,5 cm Länge und einer Gesamtdicke von ca. 0,3 cm. Sie sind kreuzförmig angeordnet. Die Schenkellängen betragen ca. 20,3 bzw. 7,6 cm (s. Abb. 21).

4.1 Bestimmung der Wirksamkeit des Feinregelelementes

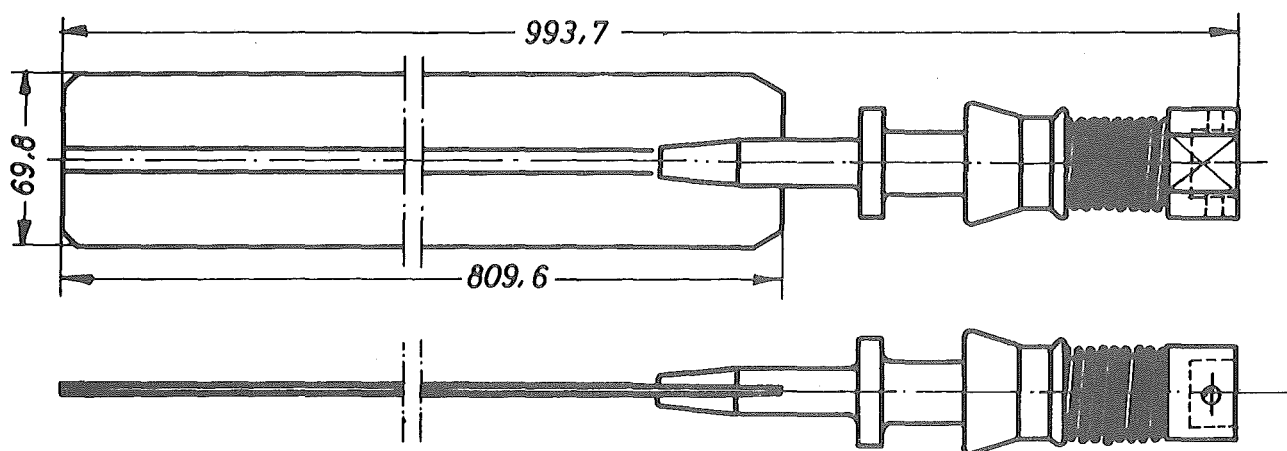
4.1.1 Kompakter Kern

In Abb. 22a ist das Ladungsschema der letzten Kernbeladung bei volleingefahrenem Feinregelelement wiedergegeben. Abb. 22b zeigt im Vergleich dazu das Ladungsschema der letzten Kernbeladung des kompakten Kerns (analog Abb. 5). Abb. 23 zeigt das RCR-m-Diagramm für die letzten Kernbeladungen des kompakten Kerns bei voll ein- bzw. voll-ausgefahrenem Regelelement. Berechnet man die kritische Masse bei volleingefahrenem Feinregelelement bei gleichen Brennstoffmengen wie beim kompakten Kern (die 4 ersten Meßpunkte des Diagramms) so ergibt sich diese zu

Abb. 21

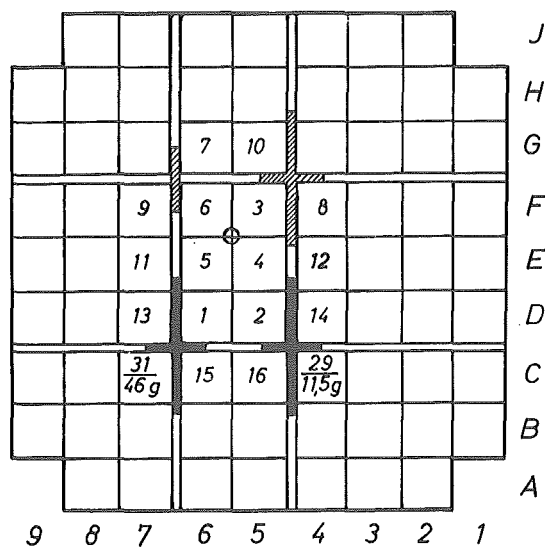


Grobregel- und Sicherheitselement



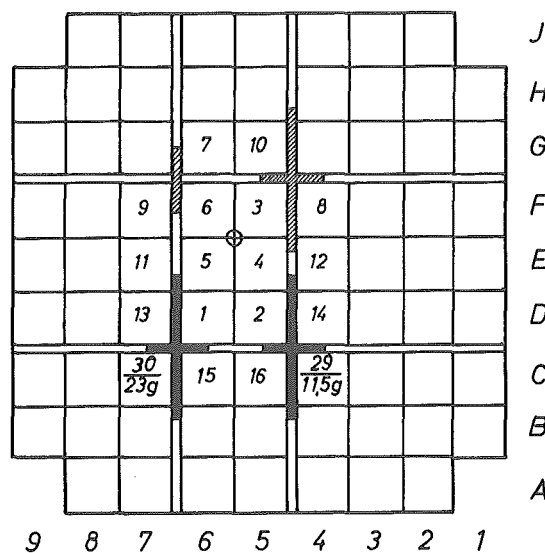
Feinregелеlement

Abb. 22a



Feinregelement voll eingefahren.
 Letzte Ladung: 2638,63 g U^{235}

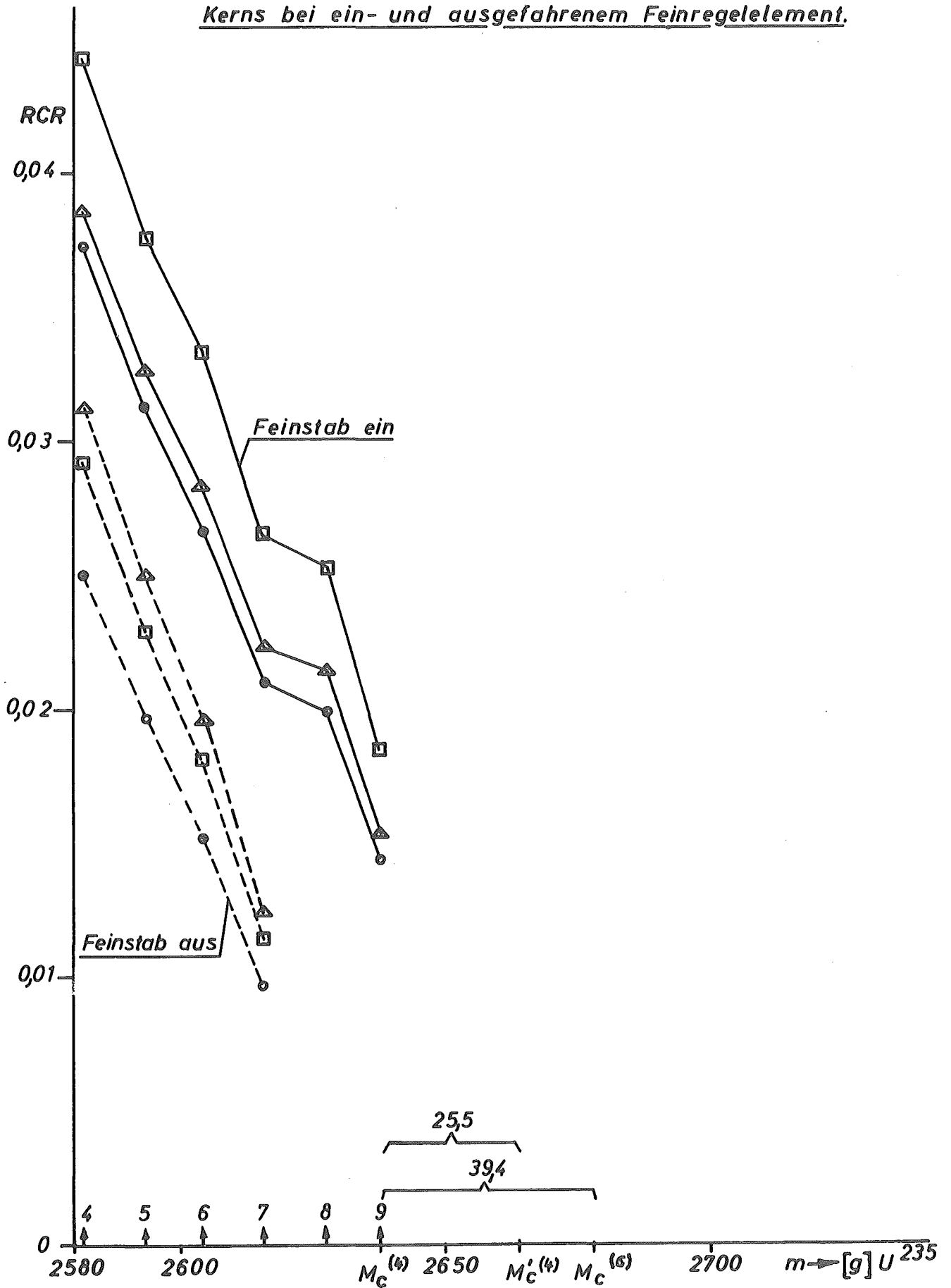
Abb. 22b



Letzte Ladung: 2615,66 g U^{235}
 Feinregelement ausgefahren.

Abb. 23

Letzte Annäherung an den kritischen Zustand des kompakten
Kerns bei ein- und ausgefahrenem Feinregelement.



$$\underline{M_c = 2663,9 \pm 1,7 \text{ g U}^{235}}$$

Gegenüber dem kompakten Kern $M_c = 2638,4 \pm 0,8 \text{ g}$ besitzt das Feinregelelement eine Wirksamkeit

$$\underline{W = 25,5 + 0,9 \text{ g U}^{235}} \quad (0,22 \% \text{ Reaktivität})$$

Dieser Wert des Feinregelelementes ist exakt gültig in einem Kern, dessen Ladungsschema Abb. 22b wiedergibt. Die Kernfiguration ist dabei gegenüber dem kompakten Kern unverändert.

Angesichts der Wichtigkeit der genauen Kenntnis des Wertes des Feinregelelementes im kompakten Kern wurde, abweichend von dem Programm für diese Versuche, noch eine andere Methode zur Bestimmung der Wirksamkeit herangezogen: die Eintauchmethode ("insertion method"). Ausgehend von den beiden letzten Ladungen wurde bei ausgefahrenem Feinregelelement der Anstieg der Geraden in dem RCR-m-Diagramm ermittelt. Die entsprechenden Messungen bei eingefahrenem Regelelement ergaben innerhalb der Fehlergrenzen den gleichen Anstieg der Geraden. Die Annahme des gleichen Anstiegs für alle Eintauchtiefen des Feinregelelementes zwischen den beiden Extremalstellungen scheint daher gerechtfertigt. In der letzten zulässigen Kernbeladung wurde das Feinregelelement jeweils in Schritten von 3'' in die - unveränderte - Kernkonfiguration eingetaucht und die zugehörigen RCR-Werte bestimmt. Dann läßt sich mit Hilfe einer einfachen Beziehung aus dem RCR-m-Diagramm die Änderung der kritischen Masse ermitteln. In Abb. 24 ist die äquivalente Brennstoffmenge gegenüber der Eintauchtiefe aufgetragen. Als maximale Wirksamkeit erhält man nach dieser Methode

$$\underline{W = 26,8 + 0,8 \text{ g U}^{235} \quad (0,23 \%)}$$

Diese Methode hat den Vorteil, daß die Kernfiguration nicht geändert worden ist.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß die Wirksamkeit sehr stark von der Kernfiguration abhängt, was u. a. auf die Neutronenleckverluste in den verschiedenen Kernanordnungen zurückzuführen ist. Wenn man daher eine Annäherung an den kritischen Zustand bei eingefahrenem Regelelement durchführt und berücksichtigt zur Ermittlung der kritischen Masse die RCR-Werte aller letzten, noch zulässigen Kernbeladungen - in Abb. 23 alle sechs Meßpunkte - so ergibt sich diese zu

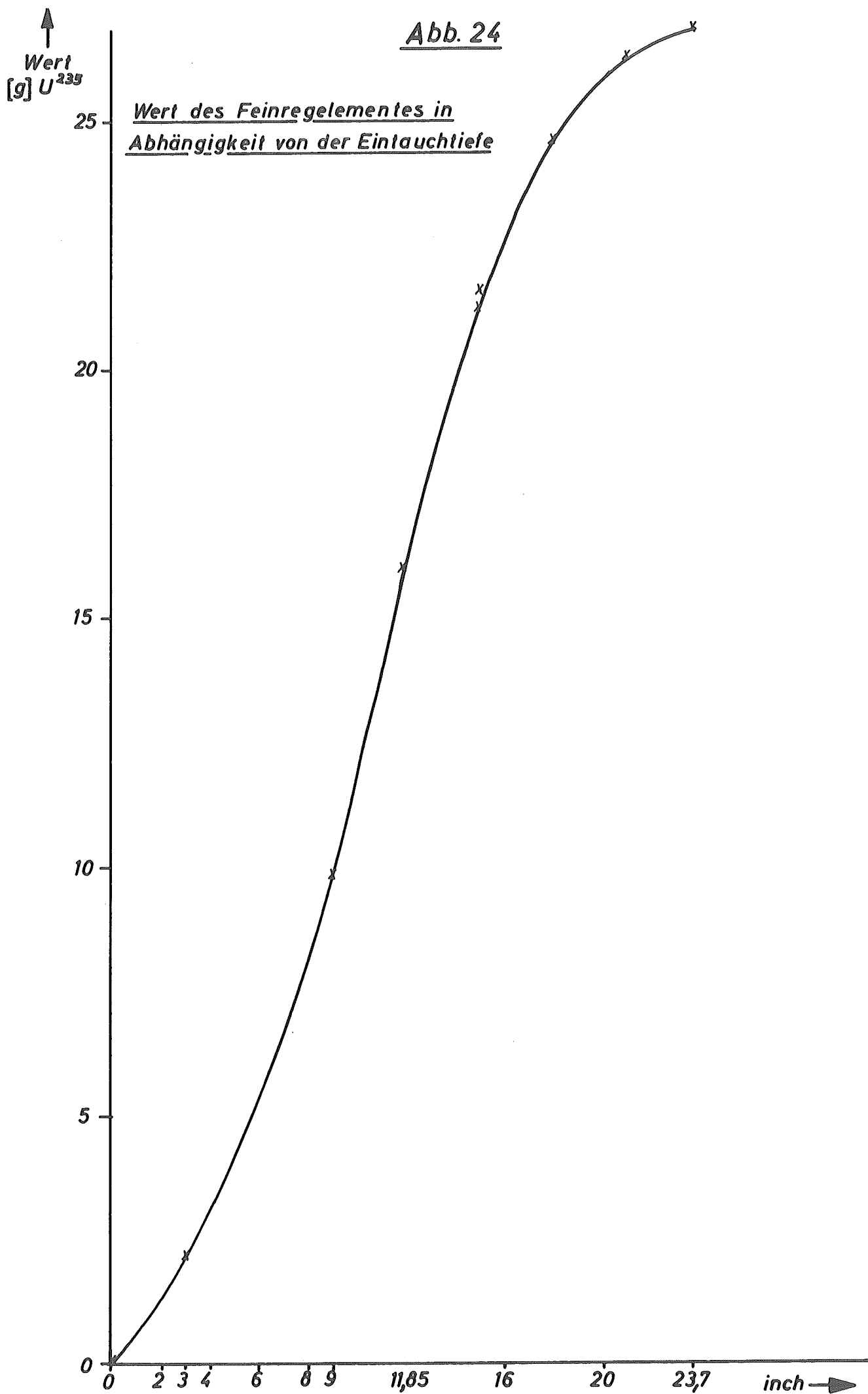
$$\underline{M_c = 2677,8 \pm 2,8 \text{ g U}^{235},}$$

was einen Wert

$$\underline{W = 39,4 + 2,9 \text{ g U}^{235} \quad (0,34 \%)}$$

entspricht. Dieser Wert ist aus einer etwas veränderten Kernfiguration ermittelt. Aber er dürfte den Verhältnissen in der Praxis näherkommen, da der obige Kern mit 16 Vollelementen und dem 23- und 11,5 g-Teilelement mit zusammen 2615,66 g U^{235} vom Standpunkt des eingefahrenen Regelelementes doch sehr stark unterkritisch ist. Dies würde auch dem Wert entsprechen, der aus Messungen mit dem gleichen Feinkontrollstab am A.W.R.E.-Reaktor angegeben worden ist ⁸⁾. Danach beträgt er $0,40 \pm 0,05 \%$.

Abb. 24



4.1.2 Länglicher Kern

Durch die Anordnung des Kernaufbaus in bezug auf die - fest vorgegebene - Lage der Regelelemente im MERLIN wurde, wie bereits oben erwähnt, das Feinregelelement rings mit Brennstoff umgeben. Das hat natürlich eine relativ große Wirksamkeit zur Folge. Bestimmt man die kritische Masse bei voll eingefahrenem Feinregelelement aus Meßpunkten bei den gleichen Brennstoffmengen, die auch zur Ermittlung der kritischen Masse bei ausgefahrenem Feinregelelement herangezogen wurden, so erhält man:

$$\underline{M_c = 3324,9 \pm 5,0 \text{ g U}^{235}}$$

d. h. eine Wirksamkeit

$$\underline{W = 119,6 \pm 2,8 \text{ g U}^{235} \quad (0,46 \%)}$$

Dieser Wert ist zwar wieder exakt gültig für eine Kernanordnung, deren letzte Ladung aus Abb. 11 hervorgeht. Wegen der großen Wirksamkeit des Feinregelelementes ist dieser Kern jedoch stark unterkritisch, was für die Praxis kaum in Frage kommen könnte. Errechnet man darum aus den letzten überhaupt möglichen Kernbeladungen die kritische Masse bei eingefahrenem Feinregelelement, so ergibt sich

$$\underline{M_c = 3360,0 \pm 2,5 \text{ g U}^{235}}$$

Das entspricht einer Wirksamkeit

$$\underline{W = 154,7 \pm 1,8 \text{ g U}^{235} \quad (0,59 \%)}$$

Der Unterschied in den letzten Brennstoffbeladungen jeweils bei eingefahrenem und ausgefahrenem Feinregelelement beträgt 139,49 g U^{235} .

4.1.3 Kern mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid

Auch im Falle des Kerns mit 3'' x 3'' großem Luftvoid tritt ein Unterschied in der Wirksamkeit des Feinregelelementes auf je nachdem man die gleiche Kernfiguration für beide Extremlagen zugrunde legt oder eine etwas veränderte. Berechnet man nämlich die kritische Masse aus Meßpunkten mit gleicher Brennstoffbeladung, so erhält man

$$\underline{M_c = 3062,9 \pm 5,0 \text{ g } U^{235}}$$

was im Vergleich zur kritischen Masse $3038,7 \pm 5,2 \text{ g } U^{235}$ eine Wirksamkeit

$$\underline{W = 24,2 \pm 3,6 \text{ g } U^{235} \quad (0,18 \%)}$$

bedeutet. Errechnet man jedoch wieder die kritische Masse aus den Meßpunkten aller noch zulässigen Kernbeladungen, so ergibt sich

$$\underline{M_c = 3075,0 \pm 1,8 \text{ g } U^{235}}$$

also eine Wirksamkeit

$$\underline{W = 36,3 \pm 2,8 \text{ g } U^{235} \quad (0,26 \%)}$$

Die beiden letzten noch zulässigen Ladungen bei ein- und ausgefahrenem Feinregelelement unterscheiden sich um 45,60 g U^{235} . Vom Standpunkt des Reaktorbetriebes scheint der obige Kern doch stark unterkritisch und damit der entsprechende erste Wert des Feinregelelementes zu gering zu sein. Der zweite Wert dürfte trotz der etwas veränderten Kernfiguration der Wirklichkeit im Betrieb näherkommen.

4.1.4 Kern mit zentralem 6" x 6" Luftvoid

Letztlich sollte lt. Programm die Wirksamkeit der Regelelemente in einem Kern mit einem 6" x 6" großen Luftvoid bestimmt werden. Aus Messungen mit äquivalenten Brennstoffmengen läßt sich eine kritische Masse bei voll eingefahrenem Feinregelelement von

$$\underline{M_c = 4157,1 \pm 3,9 \text{ g } U^{235}}$$

gegenüber $4115,6 \pm 1,9 \text{ g } U^{235}$ bei ausgefahrenem Feinregelelement ermitteln. Dies entspricht einer Wirksamkeit

$$\underline{W = 41,5 \pm 2,2 \text{ g } U^{235} \quad (0,16 \%)} \quad$$

Aus der Annäherung an den kritischen Zustand bei eingefahrenem Regelelement folgt aus den letzten noch möglichen Kernladungen eine kritische Masse

$$\underline{M_c = 4175,1 \pm 1,3 \text{ g } U^{235}}$$

Dies entspricht einer Wirksamkeit des Regelelementes von

$$\underline{W = 59,5 \pm 2,0 \text{ g U}^{235} \quad (0,23 \%)}$$

Die Differenz der letzten Kernladungen in den Extremalstellungen des Feinregelelementes beträgt hier $68,59 \text{ g U}^{235}$. Auch dieser Wert dürfte den tatsächlichen Verhältnissen näherkommen als der obige kleinere Wert; denn in der Praxis wird immer Überschußreaktivität eingebaut, die zu größeren Kernanordnungen führt als sie für obige Berechnung zugrunde gelegt ist.

4.2 Bestimmung der Wirksamkeit des Grobregelelementes

Anders als beim Feinregelelement liegen die Verhältnisse beim Grobregelelement. Denn hierbei wird die Kernfiguration bei voll eingefahrenem Regelelement infolge seines großen Wertes doch wesentlich verändert. Eine Bestimmung der kritischen Masse aus Meßpunkten mit äquivalenten Brennstoffladungen ist praktisch nicht mehr möglich, so daß nur die Möglichkeit besteht, aus der Differenz der kritischen Massen bei ein- und ausgefahrenem Grobregelelement dessen Wirksamkeit anzugeben.

4.2.1 Kompakter Kern

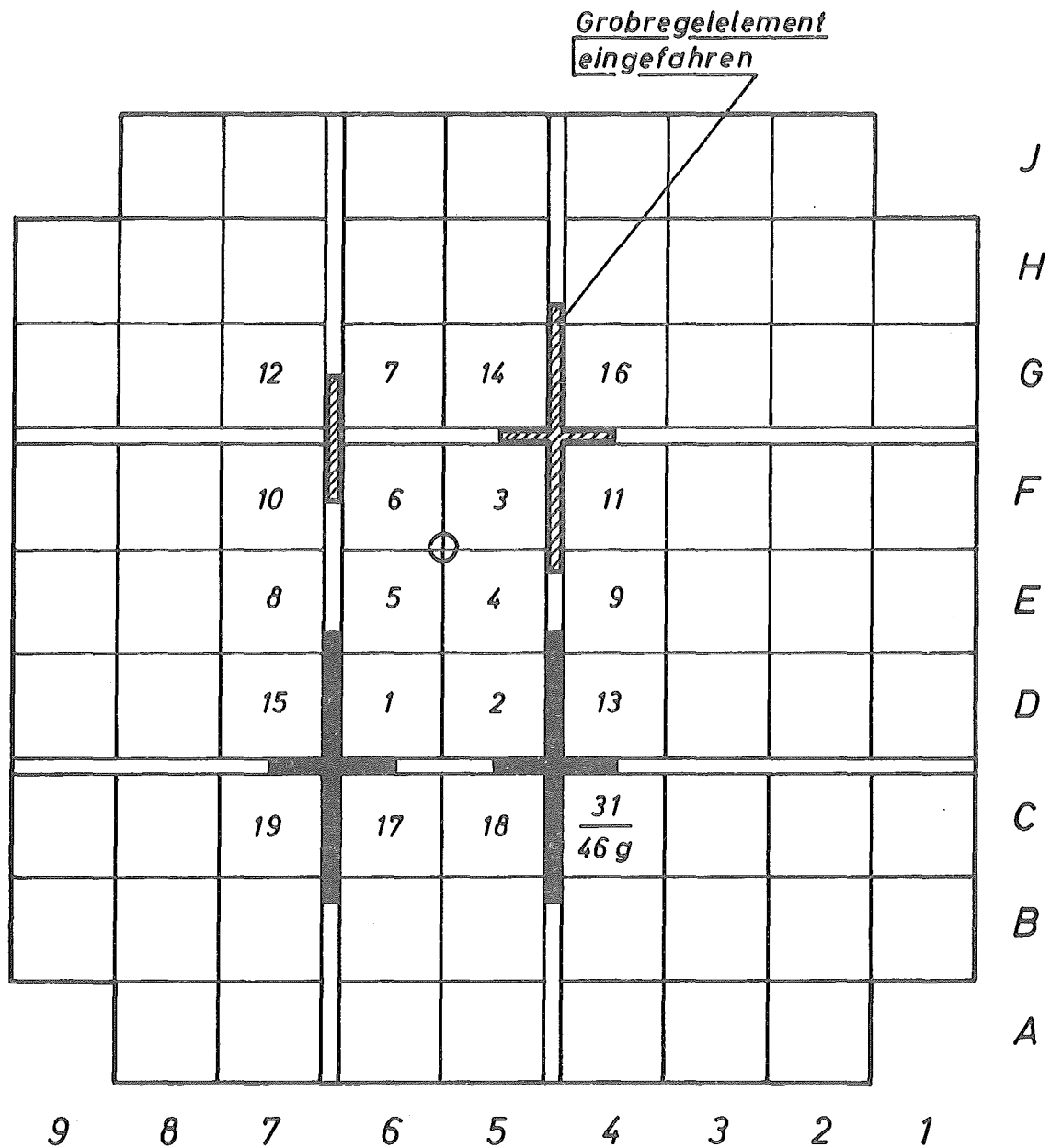
In Abb. 25 ist das Ladungsschema der letzten Kernladung bei volleingefahrenem Grobregelelement wiedergegeben. Aus dem RCR-m-Diagramm läßt sich die kritische Masse zu

$$\underline{M_c = 3248,2 \pm 2,4 \text{ g U}^{235}}$$

errechnen. Das bedeutet eine Wirksamkeit

$$\underline{W = 609,8 \pm 1,3 \text{ g U}^{235} \quad (4,27 \%)}$$

Abb.25



Letzte geladene Brennstoffmenge: 3110,61 g U^{235}

$$\underline{M_C = 3248,2 \pm 2,4 g U^{235}}$$

Die Wirksamkeit des Grobregелеlementes wurde von P.A.Solari ⁹⁾ in der kritischen Anlage "HORACE" (AWRE Aldermaston) in einem 4 x 5 Brennelement-Kern aus Verdopplungszeitmessungen zu 3,43 % bestimmt. Dabei wurde für die verzögerten Neutronen ein Faktor $\bar{\gamma}_i = 1$ zugrunde gelegt. Nach neueren Berechnungen ist dieser Faktor jedoch durch $\bar{\gamma}_i = 1,28$ zu ersetzen ¹⁰⁾. Mit diesem Wert beträgt die Wirksamkeit 4,39 % in dem 4 x 5 Kern. Dieser Kern entspricht ungefähr dem in der subkritischen Anlage gemessenen Wert (19 Voll- und 3 Teilelemente). Die in der subkritischen Anlage ermittelte Wirksamkeit des Grobregелеlementes - 4,27 % - stimmt also gut mit obigem Wert von 4,39 % überein. Andererseits spricht diese Übereinstimmung für die Zuverlässigkeit der Umrechnungsfaktoren C, die in den subkritischen Messungen zugrunde gelegt sind.

4.2.2 Länglicher Kern

Die Bestimmung der kritischen Masse bei eingefahrenem Grobregелеlement gestaltet sich schwierig; denn in der länglichen Kernanordnung sind maximal 21 Brennelemente einsetzbar. Im Falle des eingefahrenen Grobregелеlementes ist man aber noch sehr weit von der Kritikalität entfernt, so daß die Extrapolation im RCR-m-Diagramm einen zu geringen Wert für die kritische Masse liefert. Aus dem RCR-m-Diagramm ermittelt man

$$\underline{M_c = 3752,0 \pm 16 \text{ g U}^{235}}$$

und damit die Wirksamkeit zu

$$\underline{W = 546,7 \text{ g U}^{235} (1,9 \%)}$$

Bei dem länglichen Kern darf also nur eine geringe Überschußreaktivität eingebaut werden.

4.2.3 Kern mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid

Die kritische Masse ergibt sich bei eingefahrenem Grobregелеlement zu

$$\underline{M_c = 3749,1 \pm 0,6 \text{ g U}^{235}}$$

d. h. die Wirksamkeit ist

$$\underline{W = 710,4 \pm 5,2 \text{ g U}^{235} \quad (4,21 \%)}$$

4.2.4 Kern mit zentralem 6'' x 6'' Luftvoid

Bei der Messung der Wirksamkeit des Grobregелеlementes in dieser Anordnung ergibt sich eine Schwierigkeit, die durch die andere Anordnung von Sicherheits- und Grobregелеlement in der subkritischen Anlage gegenüber dem Reaktor bedingt ist. Würde man das Void in der gleichen Lage im Kern belassen Abb. 26a (analog Abb. 17), so würde man die Wirksamkeit des Grobregелеlementes in einer solchen Stellung ermitteln, die den Verhältnissen im Reaktor nicht entspricht. (vergl. dazu Abb. 26b) Mit einem kleinen Kunstgriff kann man dennoch den Wert dieses Regелеlementes unter Berücksichtigung der Reaktorverhältnisse ermitteln. Spiegelt man nämlich den Kern der Abb. 26a um eine Achse in der Mitte der Reihe E, so erhält man einen Kern, der dem obigen entspricht, also auch die gleiche kritische Masse besitzen muß. Der Unterschied besteht lediglich darin, daß das Void um eine Reihe auf der Gitterplatte versetzt ist. Damit ist das Grob-

regelement völlig mit Brennstoffelementen umgeben, so wie es im Reaktor der Fall wäre. - Abb. 26 c zeigt das Ladungsschema der letzten Ladung bei ganz eingefahrenem Regelement. Die kritische Masse ergibt sich

$$\underline{M_c = 4767,1 \pm 3,9 \text{ g U}^{235}}$$

Die Wirksamkeit ist also

$$\underline{W = 651,5 \pm 2,2 \text{ g U}^{235} \quad (2,20 \%)} \quad (2,20 \%)$$

Dieser geringe Wert ist sicherlich auf die starken Leckverluste der Neutronen in dem großen Void zurückzuführen. Denn durch das eingefahrene Regelement wird das Maximum des thermischen Flusses von diesem weg verschoben, so daß in der Tat sehr viele Neutronen in dem Void entweichen können, die dann für weitere Kernreaktionen wegfallen.

Alle Messungen des Wertes der Regelemente wurden in der Weise vorgenommen, daß lediglich das zu messende Regelement in den Kern eingefahren ist. Beim Betrieb des Reaktors wird es aber fast immer vorkommen, daß beide Steuerelemente mehr oder weniger tief in den Kern hineinragen. Es findet dann eine Wechselwirkung zwischen ihnen statt ¹¹⁾ wodurch die Wirksamkeit geändert wird. So ergibt sich beispielsweise die Gesamtwirksamkeit beider gleichzeitig eingefahrener Sicherheitsstäbe nicht als die doppelte Wirksamkeit der Einzelstäbe, sondern sie ist niedriger. Dieser Effekt - bezogen auf die Regelemente - müßte dann aber im Reaktor selbst ermittelt werden.

Zum Schluß sollte noch einmal daran erinnert werden, daß alle bisherigen Messungen bei einer Temperatur von 25° C durchgeführt worden sind. Wie aber verhält sich der Reaktor bei höheren Temperaturen?

5. Bestimmung des Temperaturkoeffizienten der Reaktivität

Bei einem Leistungsreaktor interessiert in erster Linie die durch den Reaktor erzeugte Wärme, die dann für eine weitere Nutzanwendung herangezogen wird. Für Forschungsreaktoren aber legt man den größten Wert auf den Neutronenfluß und die erzeugte Wärme wird als unerwünschte Beigabe über Austauscher an das Kühlsystem des Reaktors abgegeben. Sollte die Kühlung jedoch einmal aus irgendeinem Grunde unzureichend sein, so erhebt sich sogleich die Frage nach dem Verhalten des Reaktors bei Erwärmung. Dies wird bestimmt durch das Ineinandergreifen verschiedener Effekte, und zwar:

- 1.) der Reaktorkern dehnt sich aus,
- 2.) die nuklearen Eigenschaften im Kern und im Reflektor ändern sich.

Man faßt alle Effekte zusammen in dem sog. Temperaturkoeffizienten der Reaktivität, den man definiert als die relative Änderung des effektiven Multiplikationsfaktors pro Grad Temperaturerhöhung

$$\alpha = - \frac{1}{C.M_c} \frac{dm}{dT}$$

(Das negative Vorzeichen rührt daher, daß dm sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann.)

Abb. 26



Geladene Brennstoffmenge:

4067,04 g U²³⁵



Position des Grobregulelementes im Reaktor im Kern der Abb. 26a



Position des Grobstabs in der subkritischen Anlage

Letzte Ladung beim Kern mit 6''x 6''
Luftvoid mit eingefahrenem Grobre-
gelelement.

Geladene Brennstoffmenge: 4650,48g U²³⁵

Ladungsschemata des Kerns mit zentralem 6"x 6" großem Luftvoid

Die praktische Durchführung der Messung dieser Größe in der subkritischen Anlage geschieht in der Weise, daß das Wasser in dem Abblaßtank durch elektrische Erhitzer kontinuierlich innerhalb eines gewissen Temperaturbereiches erwärmt wird. Durch die dauernde Zirkulation des Wassers wird dann sowohl der Kern als auch der Reflektor gleichmäßig auf eine höhere Temperatur gebracht, die mit Hilfe eines geeichten Quecksilberthermometers abgelesen werden kann. Mit der unterkritischen Anordnung läßt sich somit nur der gemeinsame Temperaturkoeffizient (TK) von Kern und Reflektor ermitteln. Den TK des Kerns alleine kann man nicht aus den unterkritischen Messungen angeben.

5.1 Temperaturkoeffizient des kompakten Kerns

Primär läuft die Bestimmung des TK in der subkritischen Anlage darauf hinaus, die Änderung der kritischen Masse aus der Änderung der RCR-Werte bei der Temperaturerhöhung zu berechnen. Das setzt aber wieder voraus, daß der Anstieg der Geraden im RCR-m-Diagramm in dem zu untersuchenden Temperaturbereich weitgehend konstant ist. Dieser stimmte in der Tat bei 20 und 25° C überein, wie sich aus der Annäherung an den kritischen Zustand bei diesen Temperaturen ergab. (Die Konstanz des Anstiegs war auch bereits früher von unseren britischen Kollegen bei höheren Temperaturen geprüft und bestätigt worden). -

In Abb. 27, ist schematisch dargestellt, wie die Änderung der kritischen Masse $(\Delta M_c)_T$ berechnet worden ist. Man liest daraus die Proportion

$$\frac{(\Delta M_c)_T}{(M_c)_{25} - M_{22}} = \frac{(RCR)_T}{(RCR)_{25}}$$

Dabei bedeuten:

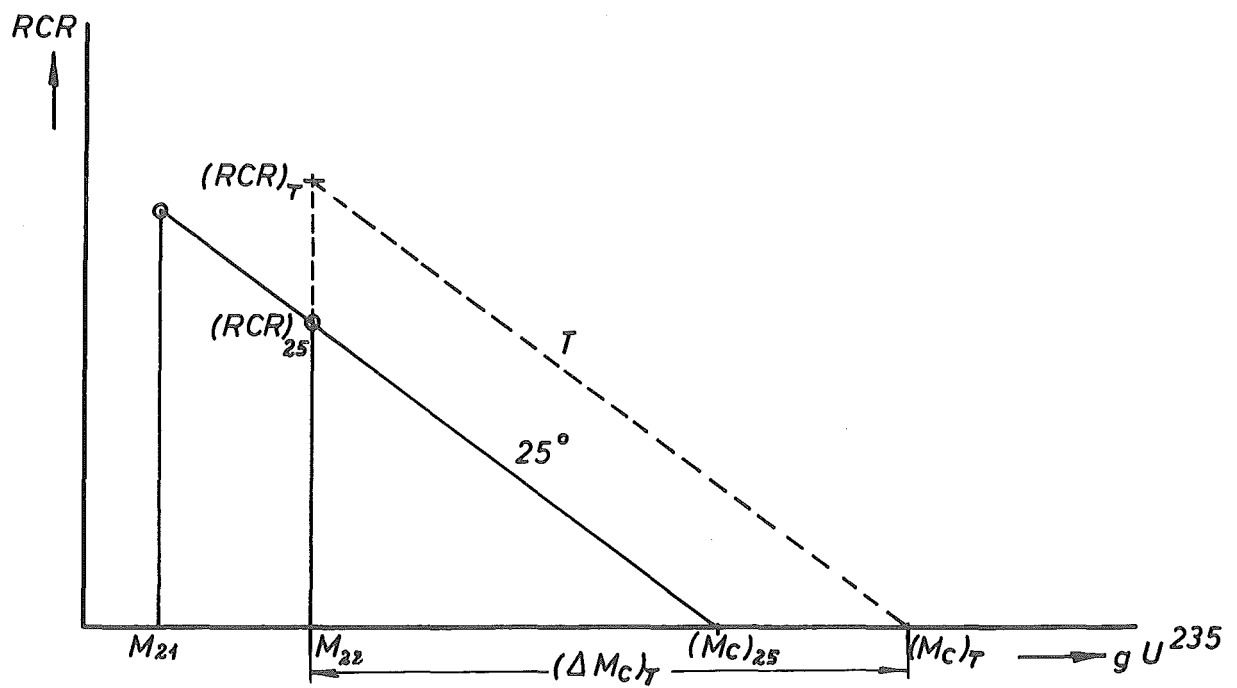
$$\begin{aligned} (M_c)_{25} &= \text{krit. Masse bei } 25^\circ \text{ C} = 2638,4 \text{ g U-235} \\ M_{22} &= \text{zuletzt geladene Brennstoffmenge} \\ &= 2604,16 \text{ g U-235} \\ (RCR)_{25} &= \text{"reciprocal counting ratio" bei } 25^\circ \text{ C} \\ (RCR)_T &= \text{"reciprocal counting ratio" bei } T^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

Trägt man die Werte für $(\Delta M_c)_T$ als Funktion von der Temperatur T ($^\circ\text{C}$) in ein Diagramm ein, so kann man mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Parabel berechnen, von der die Meßpunkte einen minimalen Abstand aufweisen - Abb.28a. Durch Differentiation erhält man dann $d(\Delta M_c)_T/dT = d(M_c)_T/dT$, was mit dem oben angegebenen dm/dT identisch ist. Daraus läßt sich der Temperaturkoeffizient α des kompakten Kerns als eine lineare Funktion von T bestimmen:

$$\underline{\alpha \times 10^5 = 4,63 - 0,128 \times T}$$

In diesem Zusammenhang interessiert natürlich sehr die Frage, bei welcher Temperatur der TK negativ wird, d. h. oberhalb welcher Temperatur bei steigender Erwärmung des Kerns die kritische Masse zunimmt. Aus Abb. 28b folgt, daß dies oberhalb 36° C geschieht. - Es muß aber noch einmal betont werden, daß α der gemeinsame Temperaturkoeffizient von Kern und Reflektor darstellt. In der Praxis am Reaktor "MERLIN" der Firma AEI in Aldermaston hat sich jedoch gezeigt, daß der Temperaturkoeffizient bei bedeutend niedrigeren Temperaturen negativ wird, was für den sicheren Betrieb außerordentlich wichtig ist.

Abb. 27

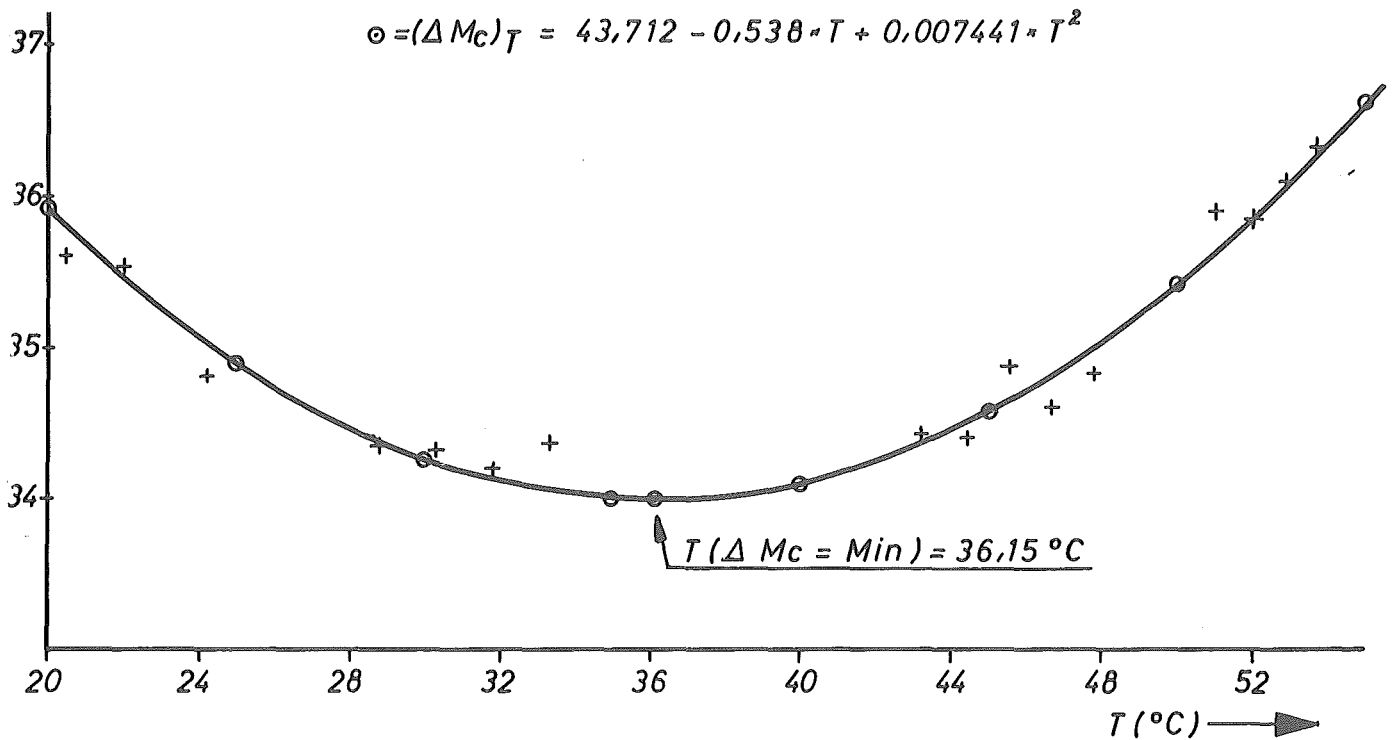
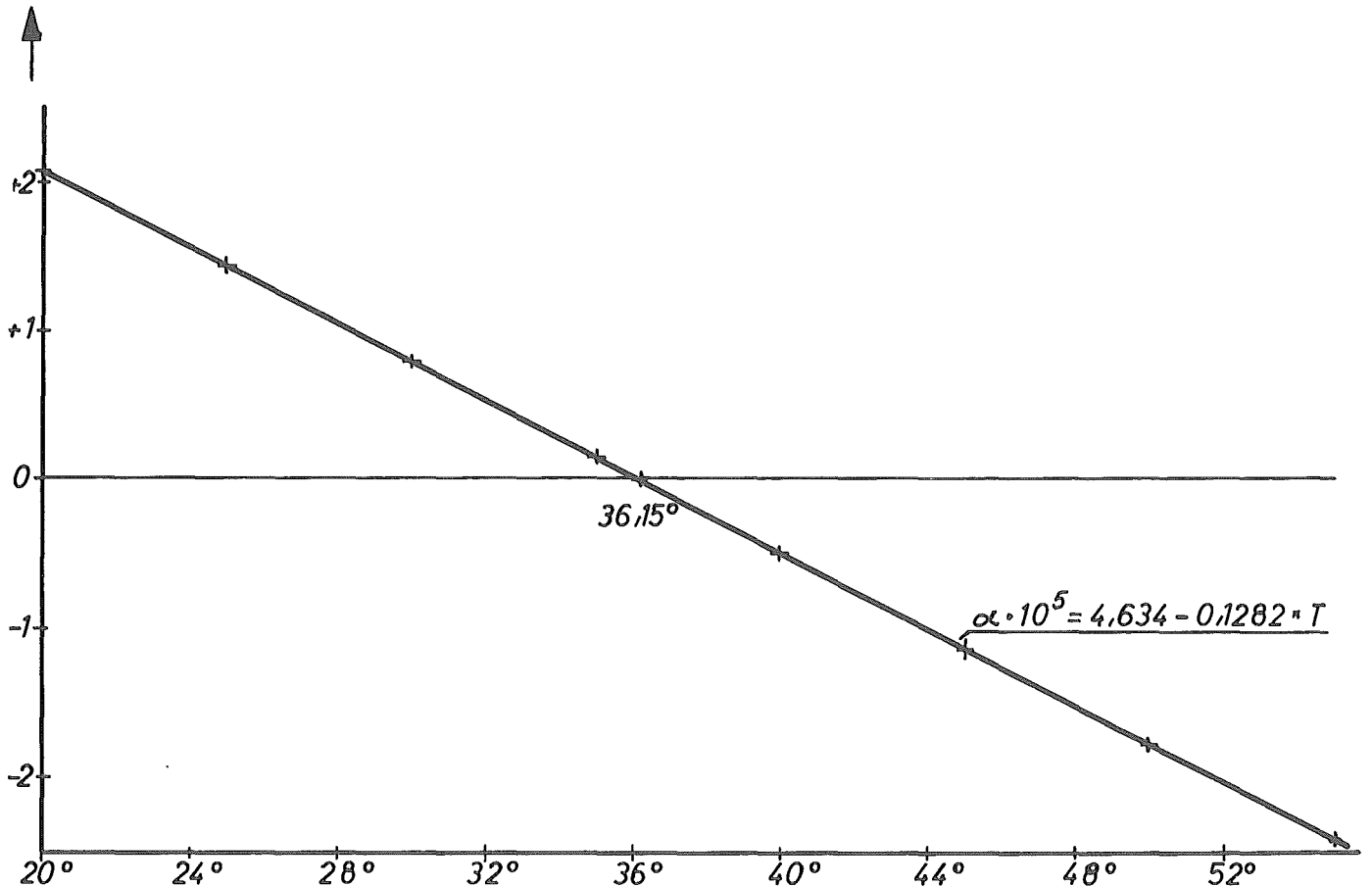


Darstellung des Extrapolationsverfahrens zur Ermittlung der Änderung in der kritischen Masse mit der Temperatur.

$(\Delta M_c)_T$ Abb. 28 a

+ = gemessen

$$\circ = (\Delta M_c)_T = 43,712 - 0,538 \cdot T + 0,007441 \cdot T^2$$

Abb. 28 b $\alpha \cdot 10^5$ 

Temperaturkoeffizient und Änderungen der kritischen Masse des komp. Kerns m. d. Temperatur von 20 bis 55 °C

5.2 TK des länglichen Kerns

In analoger Weise wie beim kompakten Kern wurde auch der gemeinsame Temperaturkoeffizient α im länglichen Kern gemessen. Man erhält den Wert

$$\underline{\alpha \times 10^5 = 7,94 - 0,22 \times T}$$

für den Temperaturbereich von 20 bis 54° C. Man sieht bereits an diesen Ausdrücken, daß eine stärkere Abhängigkeit des TK mit der Temperatur beim länglichen Kern besteht. Ändert sich im Falle des kompakten Kerns die kritische Masse um ca. 2 - 3 g U²³⁵, so tritt beim verlängerten Kern eine Änderung von etwa 9 - 10 g U²³⁵ auf. Eigentümlicherweise ist aber die Temperatur, oberhalb der α negativ wird die gleiche wie beim kompakten Kern, also 36° C.

5.3 TK des Kerns mit zentralem 3'' x 3'' Luftvoid

Sehr wichtig ist natürlich die Kenntnis des Reaktivitätsverhaltens des Reaktors bei höherer Temperatur beim Einbau von Experimenten in den Kern. Auch hier sollen Luft- bzw. Wasservoid wiederum Extremfälle darstellen, für die die Temperatur interessiert, oberhalb der α negativ wird.

Als gemeinsamer TK für einen Kern mit dem kleinen zentralen Luftvoid liefern die Messungen den Ausdruck

$$\underline{\alpha \times 10^5 = 3,77 - 0,093 \times T}$$

Aus dieser Gleichung folgt, daß α für Temperaturen $> 40^\circ$ C negativ wird. Die Änderung der kritischen Masse in dem Bereich von 15 bis 55° C beträgt maximal etwa 4 g U²³⁵.

5.4 TK des Kerns mit zentralem 3' x 3' Wasservoid

Die Erwärmung des Wassers übt offenbar eine große Wirkung auf das Reaktivitätsverhalten des Reaktors aus. Dies möge an den folgenden Abbildungen demonstriert werden. Zunächst zeigt Abb. 29 die gemessenen RCR-Werte in Abhängigkeit von der Temperatur. Das Ladungsschema dazu zeigt Abb. 15 (s.d.). Aus der stetigen Abnahme der RCR-Werte (Zunahme der Multiplikation) kann man auf eine stetige Abnahme der kritischen Masse schließen. Bei einer Temperatur von 39°C erreicht die geladene Brennstoffmenge 99,1 % der kritischen Masse. Daher muß das 11,5 g - Teilelement entfernt werden, was durch den Sprung in den Meßkurven zum Ausdruck kommt. Berechnet man aus diesen Meßkurven die Änderung der kritischen Masse und daraus mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Parabel von der die Meßpunkte minimalen Abstand aufweisen - Abb. 30, so erhält man die Gleichung

$$\underline{(\Delta M_c)_T = 84,65 - 1,945 T + 14,16 \times 10^{-3} T^2}$$

die ein Minimum bei etwa 69°C besitzt. In dem Temperaturbereich von 16 bis 54°C nimmt die kritische Masse um etwa 36 g U^{235} ab. Für den Temperaturkoeffizienten von Kern und Reflektor erhält man schließlich den Ausdruck

$$\underline{\alpha \times 10^5 = 12,20 - 0,178 \times T}$$

d. h. α wird erst oberhalb 69°C negativ.

Abb. 31 stellt zum Vergleich eine Übersicht aller im Rahmen des - erweiterten - Programms der subkritischen Versuche für den FRJ 1 gemessenen Temperaturkoeffizienten dar.

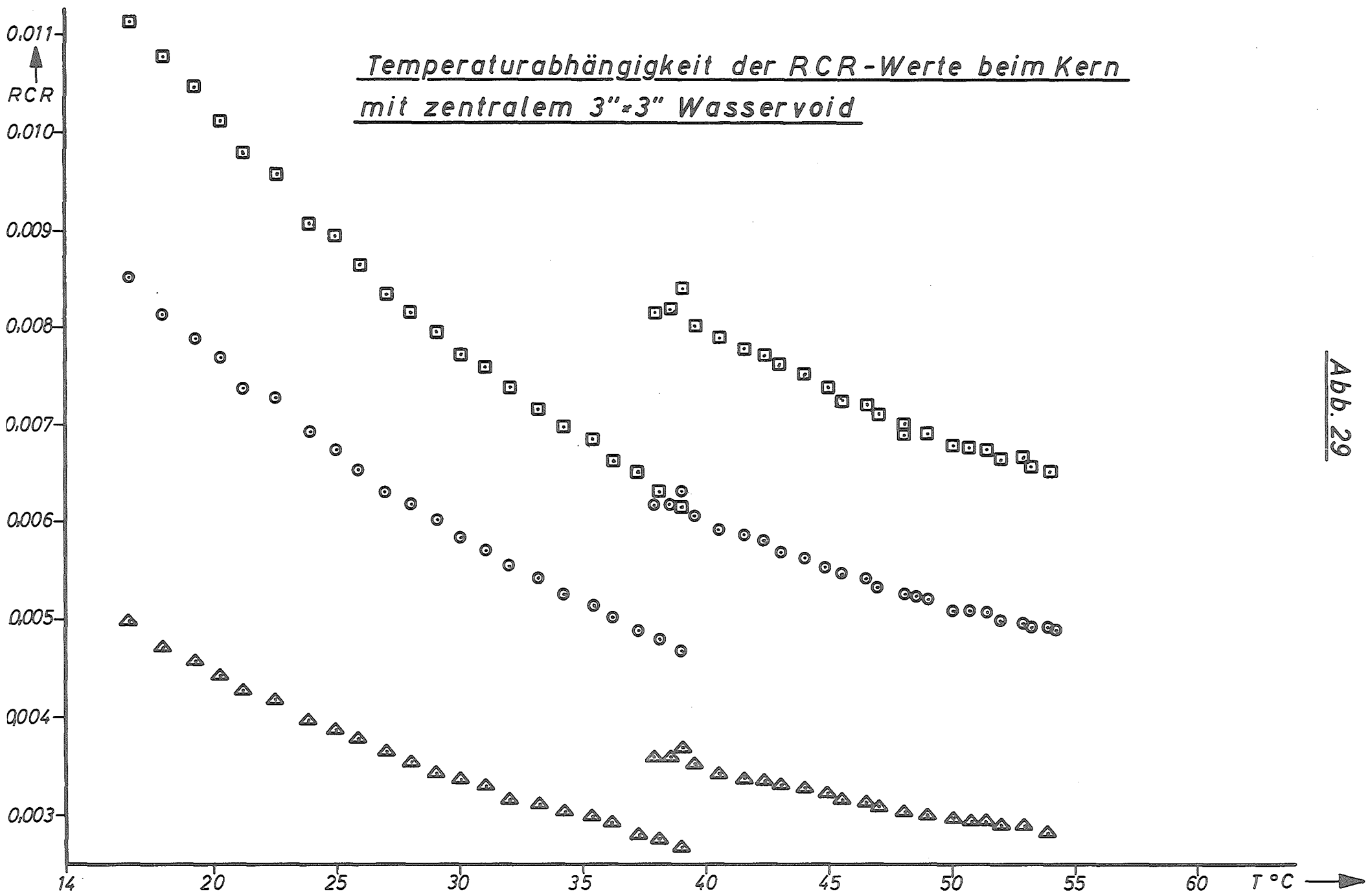
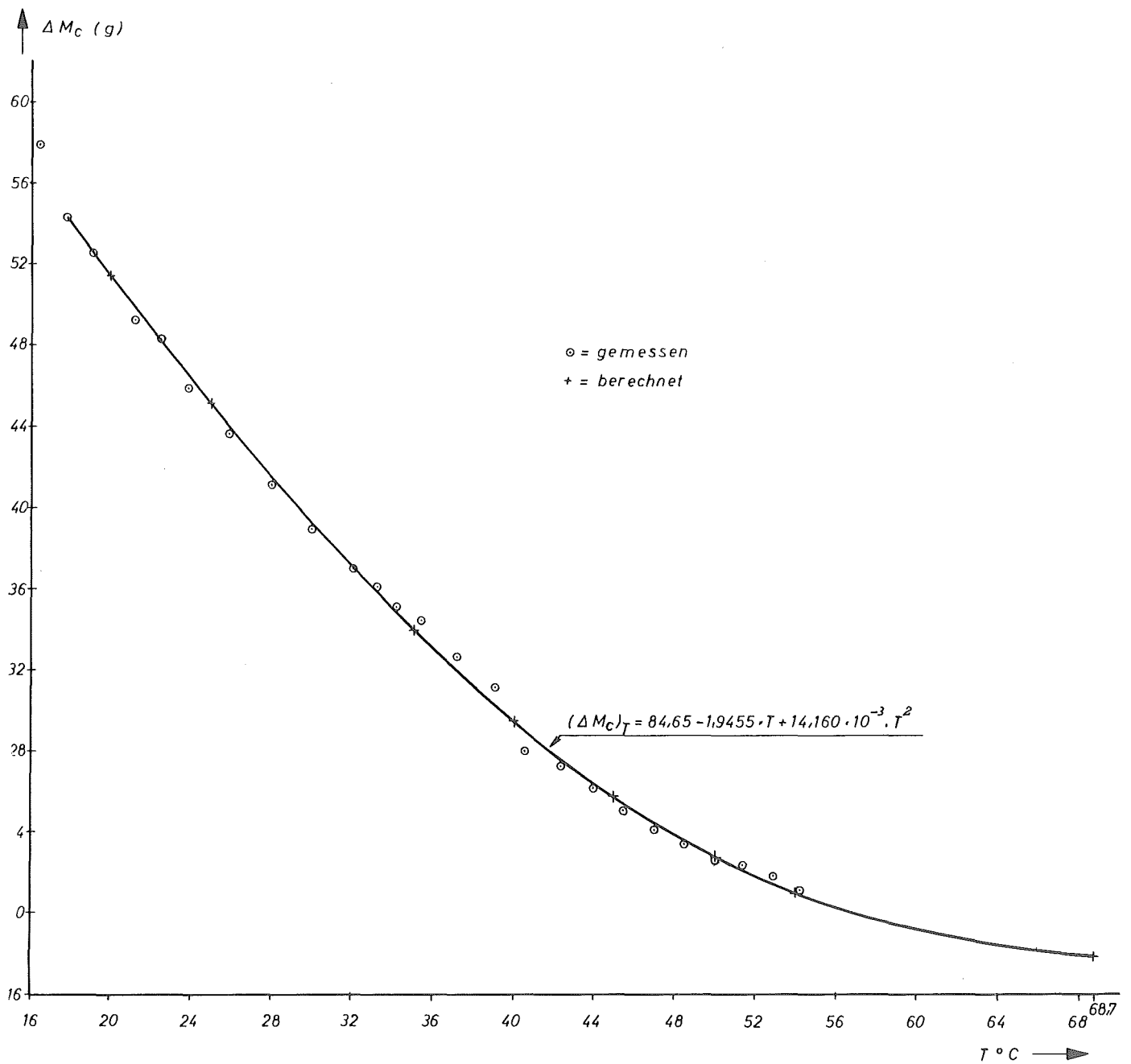


Abb. 29

Abb.30

Änderung der kritischen Masse eines Kerns mit
zentralem 3"×3" Wasservoid mit der Temperatur



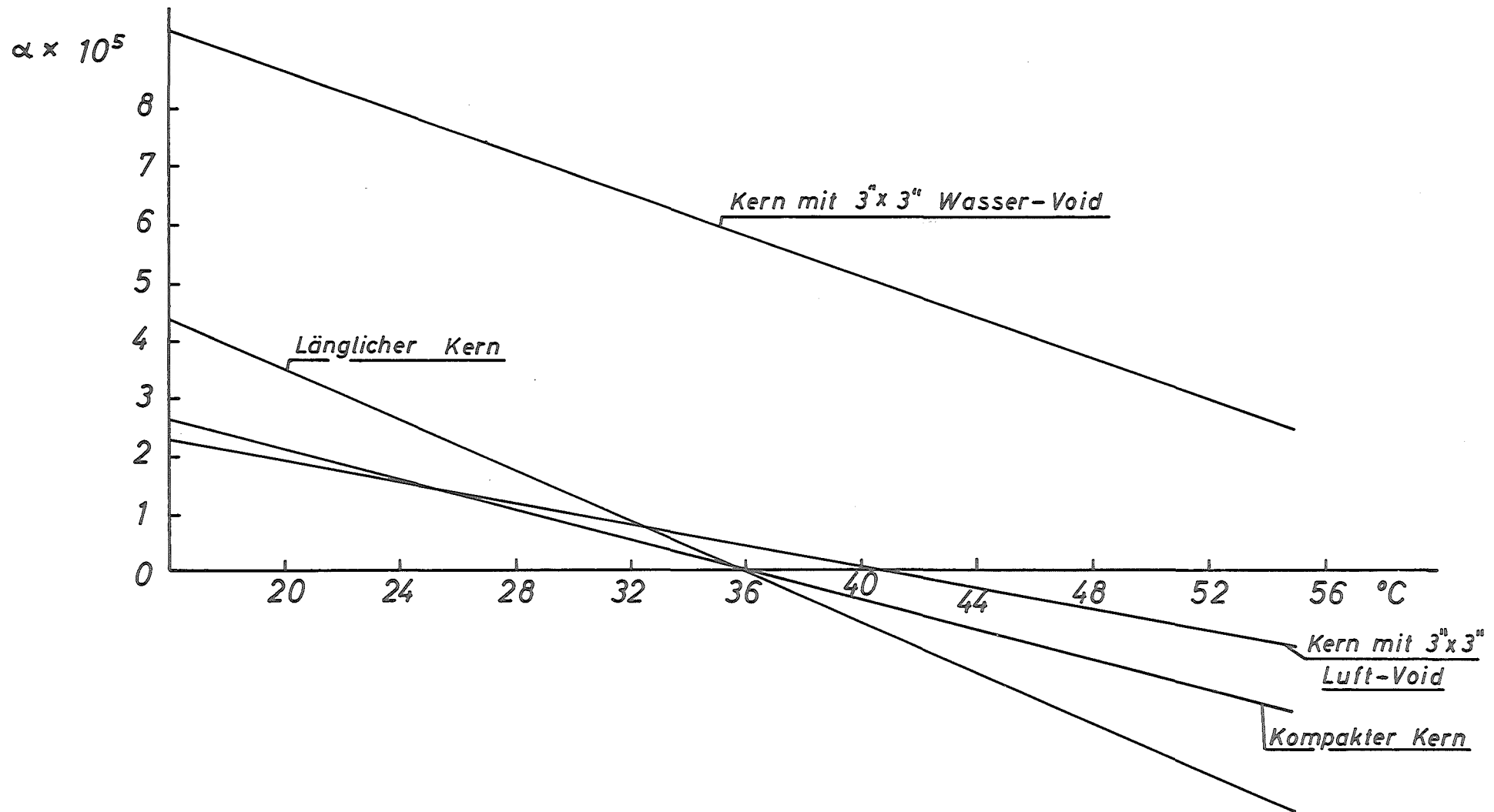


Abb. 31

Übersicht über die gemessenen Temperaturkoeffizienten.

6. Bestimmung der statistischen Gewichte im kompakten Kern

6.1 Bedeutung des statistischen Gewichtes

Man denke sich einen unvergifteten Kern, in dem Gleichgewicht hinsichtlich der Neutronenbilanz vorliege. Nun werde an einer einzelnen Stelle eine kleine Störung in den Kern hineingebracht, z. B. eine lokale Erwärmung oder die Einführung eines Neutronenabsorbers. Dadurch tritt eine Reaktivitätsänderung ein. Es leuchtet ein, daß diese Reaktivitätsänderung von der Höhe des Neutronenflusses abhängt. Demzufolge bewirkt die gleiche Störung einen unterschiedlichen Einfluß auf das Reaktivitätsverhalten des Reaktors aus, je nachdem ob sie im Zentrum oder am Rande des Kerns angebracht wird; den einzelnen Positionen im Kern kommen verschiedene statistische Gewichte zu. - Vom Standpunkt der Ein-Gruppen-Theorie ist das statistische Gewicht in einer Zelle Z eines großen unreflektierten Reaktors mit dem Volumen V definiert ¹²⁾

$$W(Z) = \frac{\int_Z \phi^2 dV}{\int_V \phi^2 dV}$$

worin Φ der Fluß bedeutet. Nimmt man als Zelle etwa das Volumen eines Brennelementes an, so kann man bei Kenntnis des statistischen Gewichtes eine Aussage über die Reaktivität eines jeden Elementes in einer bestimmten Kernanordnung machen, z. B. kann man bei Kenntnis von $W(Z)$ beim Aufbau eines jungfräulichen Kerns eine solche Anordnung der Brennelemente treffen, die bei vorgegebener Uranmenge maximale Multiplikation ergibt oder aber man kann nach längerer Betriebsdauer des Reaktors die Stärke des Abbrandes angeben und demzufolge eine Umladung bzw. Ersatzladung von Brennelementen vornehmen.

6.2 Experimentelle Ermittlung der statistischen Gewichte im kompakten Kern

Die bei diesen Versuchen durchgemessene Kernanordnung besteht aus 16 Vollelementen und dem 23 g - Teilelement (vergl. das Ladungsschema in Abb. 5). Es werden nun Borstreifen von ca. 60 cm Länge, 1,8 cm Breite und 1 mm Dicke nacheinander in die Mitte, d. h. in dem Zwischenraum zwischen der 7. und 8. Brennstoffplatte eines jeden Vollelementes eingeführt (Abb. 32a). Um den Effekt etwas zu erhöhen, wurden jeweils 3 Borstreifen eingesetzt. Der genaue Borgehalt und die Korngröße waren leider nicht bekannt, ihre Kenntnis ist aber auch nicht erforderlich, da es sich ohnehin um Relativmessungen handelt. Die Länge der Borstreifen ist so gewählt, daß eine gleichmäßige Vergiftung längs des aktiven Teils der Brennstoffplatten hervorgerufen wird. Nach jeder Veränderung der Lage der Borstreifen im Kern werden die RCR-Werte ermittelt.

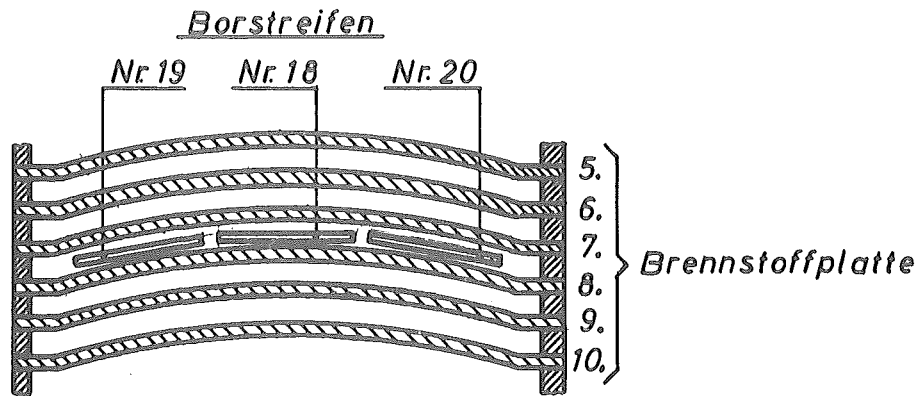
Die Berechnung der statistischen Gewichte geschieht in folgender Weise: in Abb. 32b ist schematisch ein RCR-m-Diagramm aufgezeichnet. Darin gehört zu der zuletzt geladenen Brennstoffmenge M_1 (= 2604,16 g) ein RCR_1 . Aus der vorher durchgeführten Annäherung an den kritischen Zustand läßt sich die kritische Masse M_c des unvergifteten Kerns ermitteln. Führt man nun die Borstreifen ein, so ergibt sich ein RCR_p , das bei Annahme der gleichen Neigung der Geraden im RCR-m-Diagramm einer Uranmenge M_p entspricht. Dann liest man aus Abb. 32b ab

$$\frac{RCR_p}{M_c - M_p} = \frac{RCR_1}{M_c - M_1}$$

oder mit

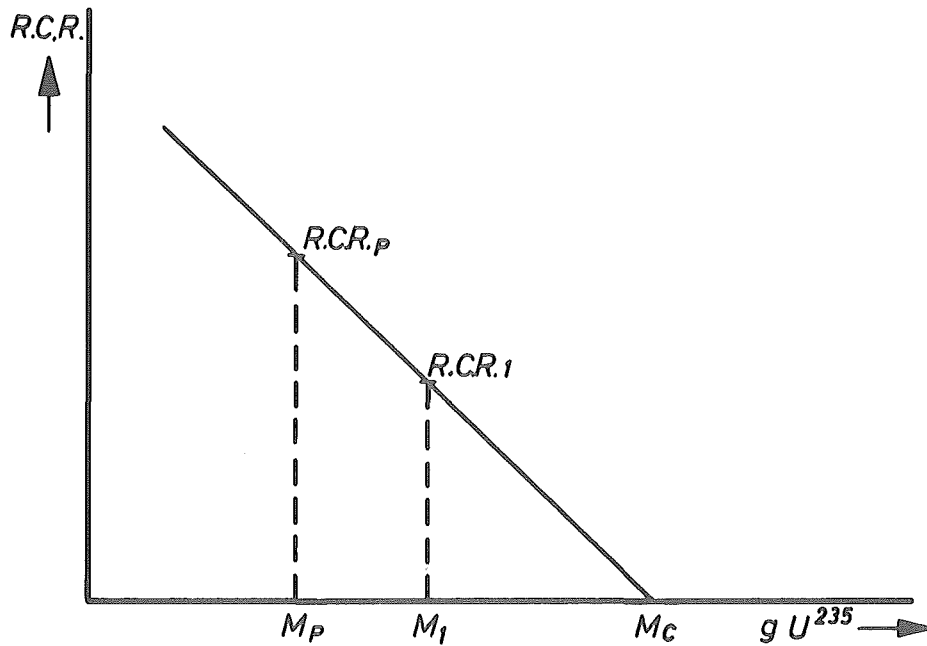
Abb. 32 a

Horizontalschnitt durch ein Brennelement



Anordnung der Borstreifen in den Brennelementen

Abb. 32 b



Skizze zur Erläuterung der Berechnungsweise
der statistischen Gewichte

$$M_c - M_p = \Delta M_p \text{ und } M_c - M_1 = \Delta M_1$$

$$\frac{RCR_p}{\Delta M_p} = \frac{RCR_1}{\Delta M_1}$$

Damit folgt für das gesuchte ΔM_p

$$\Delta M_p = \frac{RCR_p}{RCR_1} \times \Delta M_1$$

Es ist aber (s. o.)

$$RCR = \frac{SC}{CR} = \frac{\text{Source Count}}{\text{Counting Rate}}$$

Streng genommen müßte man SC nach dem Einführen der Absorberfolien erneut bestimmen. Da man diese aber lediglich als lokale Störung betrachtet, kann man die Größe SC als konstant ansehen, d. h.

$$RCR = \frac{\text{const}}{CR}$$

Damit ergibt sich

$$\frac{RCR_p}{RCR_1} = \frac{CR_1}{CR_p} \text{ und schließlich}$$

$$\Delta M_p = \frac{CR_1}{CR_p} \times \Delta M_1$$

Der "Vergiftungswert" der stets konstant gehaltenen Absorbermenge in den einzelnen Brennelementen ergibt sich dann in g U^{235} zu

$$\bar{W} = \Delta M_p - \Delta M_1,$$

was dem statistischen Gewicht in dem betreffenden Brennelement proportional ist.

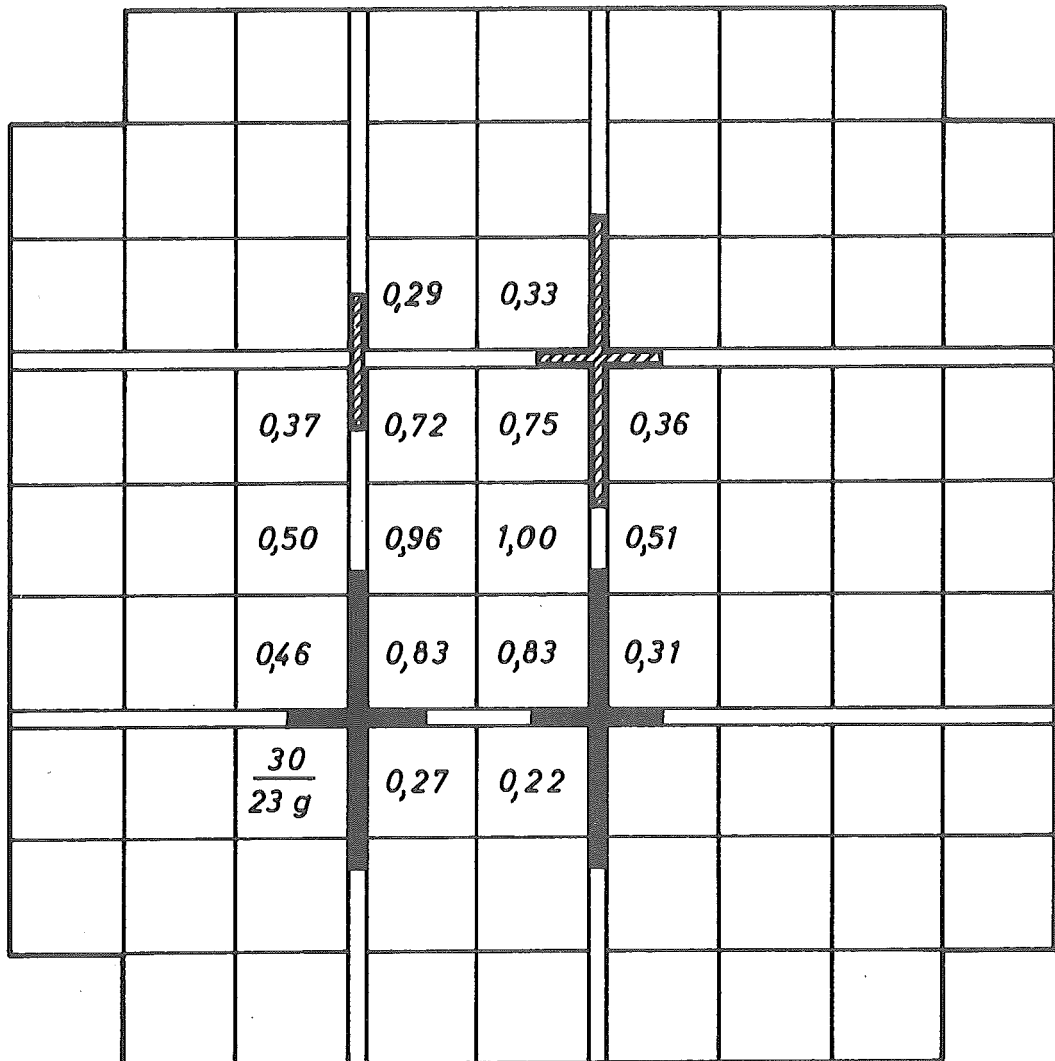
Vor den eigentlichen Messungen wurde noch einmal die kritische Masse des unvergifteten Kerns zu $2640,3 \pm 1,4 \text{ g U}^{235}$ bestimmt, was also innerhalb der Fehlergrenzen mit dem früher angegebenen Wert für den kompakten Kern übereinstimmt.

In der folgenden Tabelle sind die aus den drei Meßpunkten gebildeten Mittelwerte für die statistischen Gewichte der einzelnen Brennelemente aufgeführt. Die letzte Spalte enthält die auf das Maximum normierten Werte (siehe auch Abb. 33a). In Abb. 33b sind die relativen statistischen Gewichte in Reihe 5 der Brennelemente und in Abb. 33c in der dazu senkrechten Richtung, in Brennelementreihe E aufgetragen. Man sieht aus den beiden letzten Abbildungen, daß die statistischen Gewichte eine analoge Verteilung aufweisen wie der Neutronenfluß.

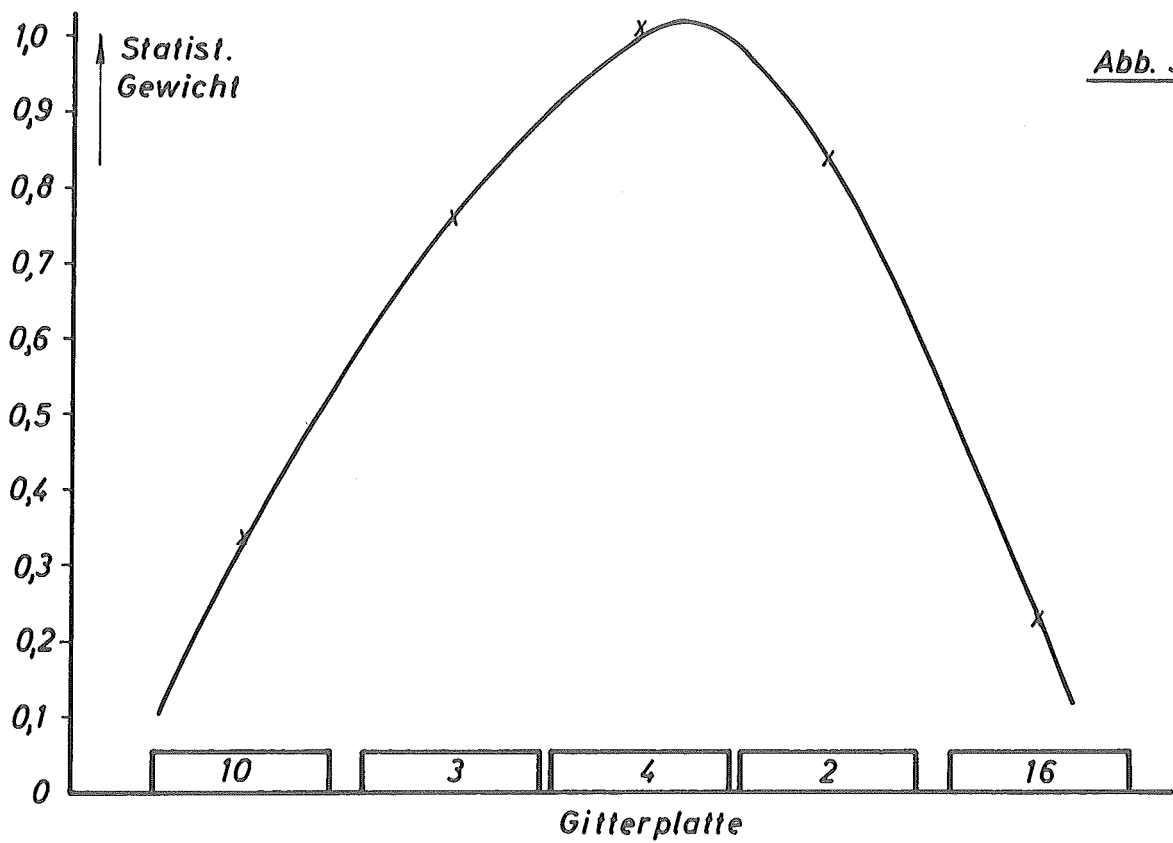
Tabelle

Element Nr.	\bar{W}	$\bar{W}/\bar{W}_{\text{max}}$
1	7,07	0,83
2	7,10	0,83
3	6,42	0,75
4	8,54	<u>1,00</u>
5	8,17	0,96
6	6,14	0,72
7	2,52	0,29
8	3,06	0,36
9	3,13	0,37
10	2,79	0,33
11	4,27	0,50
12	4,36	0,51
13	3,96	0,46
14	2,63	0,31
15	2,27	0,27
16	1,88	0,22

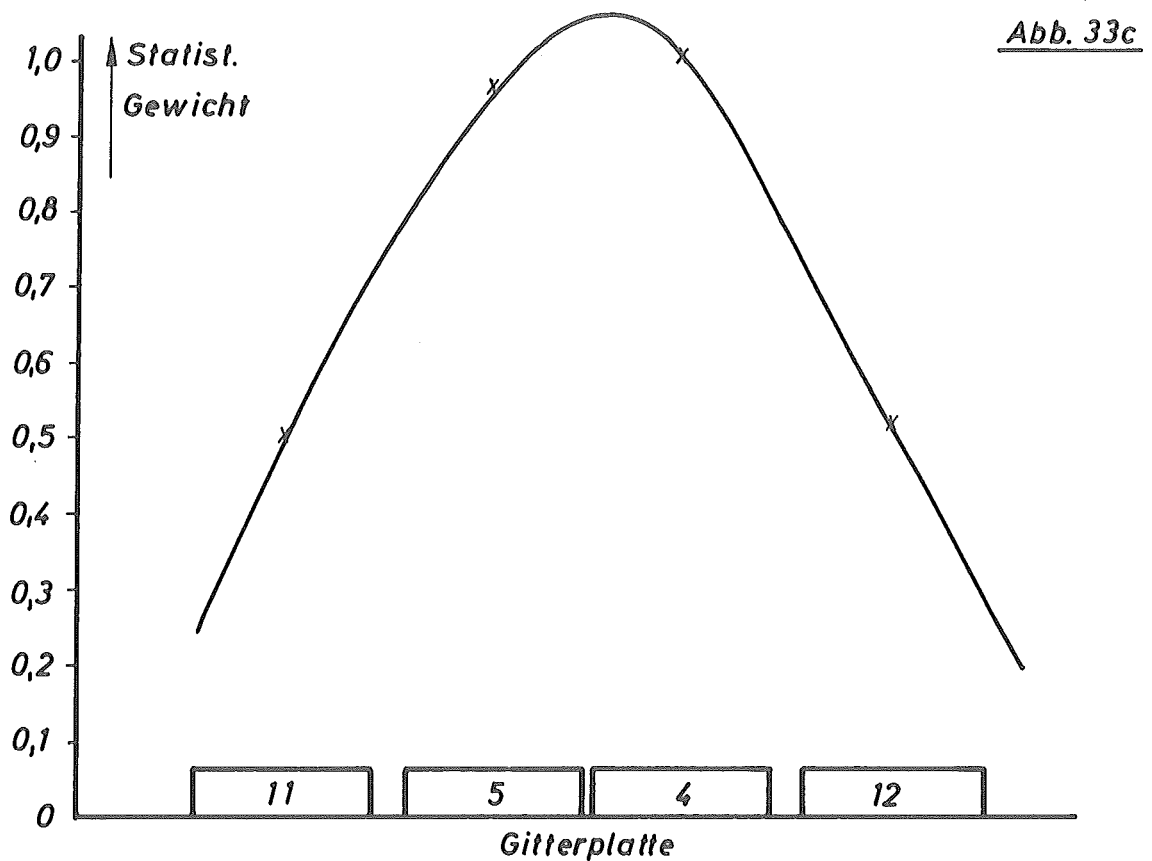
Abb. 33a



Verteilung der relativen statistischen Gewichte im
kompakten Kern.



Darstellung der statistischen Gewichte in Reihe 5 der Brennelemente



Darstellung der statistischen Gewichte in Reihe E der Brennelemente

7. Bestimmung des Voidkoeffizienten des kompakten Kerns

7.1 Bedeutung des Voidkoeffizienten

Aus den o. a. Messungen der kritischen Masse des kompakten Kerns und der Kerne mit dem zentralen kleinen und großen Luftvoid geht hervor, daß die kritische Masse durch die Einführung eines Luftvolumens zunimmt. Praktisch aber kann ein derartiges Luftvoid z. B. durch die Einführung eines Experiments in den Kern entstehen oder im Betrieb bei höherer Leistung fällt die Primärpumpe vorübergehend aus, so daß es zur Blasenbildung im Kern kommt. Nimmt in einem solchen Falle die kritische Masse zu oder ab? - Das ist die Frage. Die Beantwortung dieser Frage ist vom Standpunkt der Reaktorsicherheit sehr wichtig. Um ein Maß für diesen Sachverhalt zu bekommen, hat man den sog. Voidkoeffizienten - in der Literatur manchmal auch mit Blaskoeffizient bezeichnet - als die prozentuale Reaktivitätsänderung pro cm^3 Void definiert, also etwa:

$$\text{V.K.} = \frac{\delta k_e}{k_e} \% / \text{cm}^3$$

wobei wieder

$$\frac{\delta k_e}{k_e} = \frac{1}{c} \frac{\delta m}{M_c}$$

gegeben ist. Das Ziel dieser Versuchsreihe bestand nun darin, diesen Voidkoeffizienten für den kompakten Kern mit 16 Vollelementen und dem 23 g - Teilelement - analog dem Ladungsschema der Abb. 5 - aus den unterkritischen Versuchen zu ermitteln.

Man muß sich allerdings darüber im klaren sein, daß die Verhältnisse bei erhöhter Temperatur im Reaktor in der subkritischen Anlage nicht nachgebildet werden können. Die Luftblasen steigen

natürlich infolge ihres Auftriebs an die Oberfläche des Reaktors, aber je nach der Geschwindigkeit mit der die Blasen im Kern entstehen, kann man den Ort der Blase im Innern des Kerns annehmen, und zwar in erster Linie im Zentrum, da dort die größte Wärmeentwicklung vorliegt. Es kommt also darauf an bei den Versuchen, Luftvoids in dem Innern des Kerns anzubringen.

7.2 Durchführung der Messungen

Zu diesem Zweck wurden Streifen aus Plexiglas (''perspex'') von ca. 60 cm Länge, 1,3 cm Breite und 0,16 cm Dicke an zahlreichen Stellen durchbohrt. (Plexiglas ist etwas schwerer als Wasser; seine Dichte beträgt $1,18 \text{ g/cm}^3$). Diese Streifen (s. Abb. 34) wurden dann von beiden Seiten mit ''Lassothe'' - eine Art ''Tesa''-Film - beklebt. Lassothe ist durchsichtig, ziemlich elastisch und hat die Eigenschaft, sich in Wasser nicht von seiner Unterlage zu lösen. Die auf diese Weise erzeugten Voids wurden dann zwischen den Brennstoffplatten befestigt, so wie in Abb. 35a skizziert ist. Für die eigentlichen Messungen wurden allerdings Al-Streifen mit 99,8 % Al benutzt von annähernd gleicher Größe wie die Perspexstreifen. Ein solcher ist in der Mitte von Abb. 34 zu sehen. Diese Al-Streifen werden nach Abb. 35b in verschiedene Positionen in die Brennelemente eingeführt. Abb. 36 zeigt den Schlüssel, nach dem die Positionen in den Brennelementen benannt wurden. Die Al-Streifen müssen an den Perspex-Streifen kalibriert werden.

Abb. 34

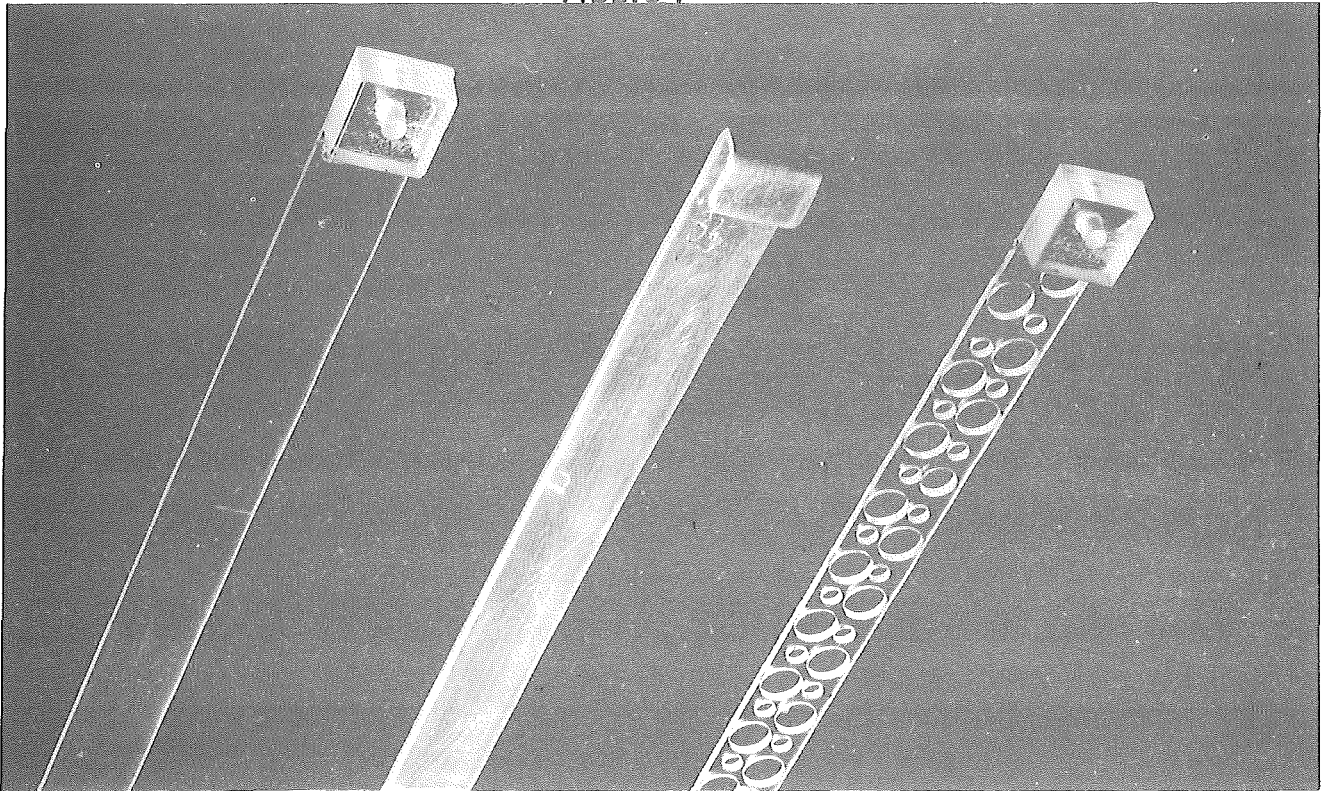
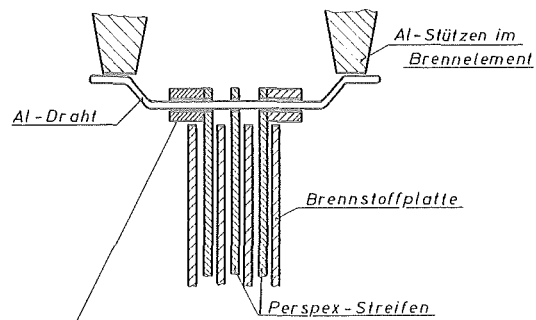
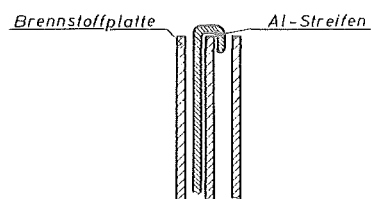


Abb. 35a



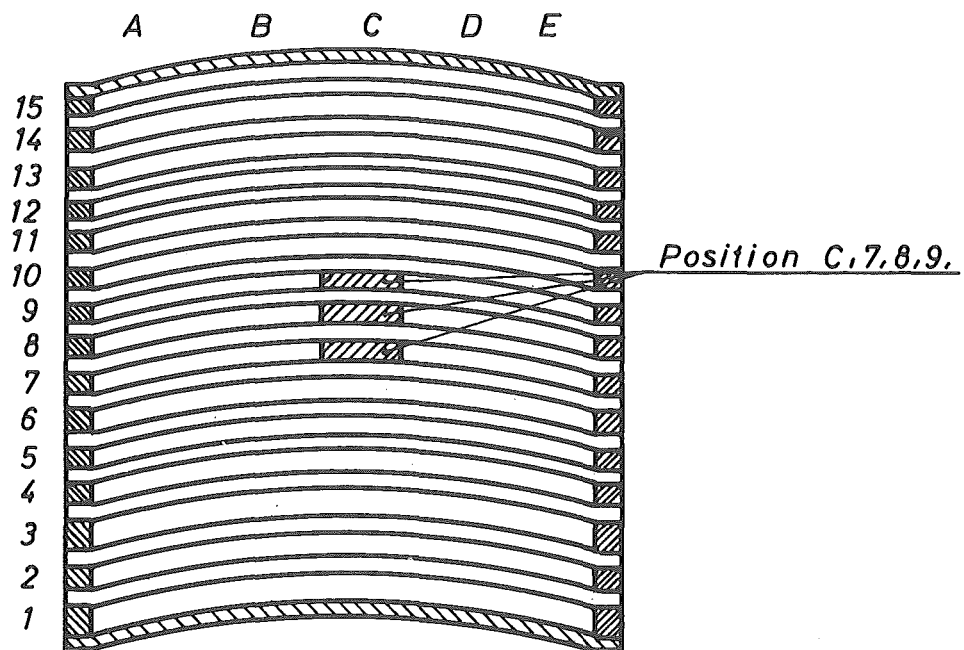
Die an der oberen Seite der Perspex-Streifen
angebrachten Würfel waren mit in Chloroform
gelöstes Perspex angeklebt

Abb. 35b



Einbringen von Al- und Perspex-Streifen
zwischen den Platten eines Brennelementes

Abb. 36



Schema zur Angabe der Positionen
der Al-Streifen im Brennelement

7.3 Kalibrierung der Al-Streifen

Dazu werden 6 durchbohrte und anschließend von beiden Seiten mit Lassotheene verklebte Perspex-Streifen in die beiden zentralen Brennelemente Nr. 4 und Nr. 5 (s. Abb. 5) eingeführt. Man erhält dadurch einen maximalen Einfluß der Luftvoids auf die Reaktivität, der sich in einer Abnahme der Zählrate bzw. Anstieg der RCR-Werte bemerkbar macht. Wenn man dann die gleiche Anzahl Al-Streifen in die gleichen Positionen innerhalb der Brennelemente bringt, so ergeben sich andere RCR-Werte. Ist nun das Luftvolumen bzw. Al-Volumen bekannt, so läßt sich die Reaktivitätsänderung/cm³ aus dem Verhältnis der Differenz der RCR-Werte und dem entsprechenden Volumen berechnen. Aus den Meßwerten der drei Zähler ergibt sich dann im kompakten Kern das Verhältnis der Reaktivitätsänderungen von

$$\frac{1 \text{ cm}^3 \text{ Luft}}{1 \text{ cm}^3 \text{ Al}} = 0,80 \pm 0,05$$

als Mittel von drei Werten, d. h. ein Luftvolumen V hat die gleiche Wirksamkeit wie das 0,8-fache desselben Al-Volumens.

(Anm. Dieses Verhältnis ist noch etwas größer bei Magnesium, aber leider standen keine Mg-Streifen zur Verfügung).

Die Kalibrierung setzt natürlich die Kenntnis der einzelnen Volumina voraus. Im Falle des Aluminiums mit einem Reingehalt von 99,8 % geschah dies durch Wägung. Die Dichte des Al wurde lt. Etherington zu 2,70 g/cm³ angesetzt. Etwas schwieriger gestaltete sich die Bestimmung der Luftvolumina, da die in drei verschiedenen Größen in die Perspex-Streifen gebohrten Löcher nicht in allen Fällen eine kreisrunde Form besaßen. Der Durchmesser wurde jeweils mit dem Kathetometer gemessen und über eine representative Zahl gemittelt. Die Dicke der Perspex-Streifen wurde auf die gleiche Weise bestimmt. Damit betrug das

für die Kalibrierung benutzte

Gesamtvolumen der Luftlöcher in 6 Perspex-Streifen	33,97 cm ³
Gesamtvolumen von 6 Al-Streifen	75,52 "

Es sollte noch erwähnt werden, daß durch das Aufkleben des Lassotheke kein Effekt beobachtet werden konnte. Dies wurde geprüft durch Vergleich der Messungen von Perspex-Streifen, (Abb. 34 links) die einmal mit der Folie beklebt waren und zum anderen ohne jede Folie.

7.4 Messergebnisse

7.4.1 Ermittlung des mittleren Voidkoeffizienten der Reaktivität im kompakten Kern

Dabei soll festgestellt werden, wie sich die Reaktivität ändert, wenn man Absorberstreifen an die gleiche Stelle eines jeden Brennelementes einführt. Man kann annehmen, daß innerhalb eines Brennelementes im Zentrum ein maximaler, am Rande ein minimaler Einfluß eines Absorbers auf die Reaktivität hervorgerufen wird. Wegen dieser Annahme wird daher zunächst eine Annäherung an den kritischen Zustand durchgeführt, wenn 1 Al-Streifen pro Brennelement in Spalt 8 eingesetzt ist. Aus dem RCR-m-Diagramm läßt sich dann die Neigung (slope) der mittleren Geraden der letzten Meßpunkte ermitteln. In einer weiteren kritischen Annäherung wird 1 Al-Streifen in Spalt 14 pro Brennelement eingeführt. (Dabei wird eine symmetrische Verteilung innerhalb eines jeden Brennelementes vorausgesetzt). Auch für diesen Fall wird aus dem RCR-m-Diagramm die mittlere Neigung der Geraden der letzten Meßpunkte berechnet. Legt man das Mittel der beiden Neigungen zugrunde, so errechnet sich daraus und den zuletzt gemessenen RCR-Werten mit je einem Al-Streifen im Zen-

trum eines jeden Brennelementes die Zunahme der kritischen Masse gegenüber dem unvergifteten kompakten Kern. Aus der oben angegebenen Beziehung läßt sich diese Massenänderung - bezogen auf 1 cm^3 Al und daher auf 1 cm^3 Luft - in Reaktivität umrechnen. Für den mittleren Voidkoeffizienten der Reaktivität erhält man für den kompakten Kern den negativen Wert:

$$4,1 \times 10^{-4} \% / \text{cm}^3$$

Das negative Vorzeichen deutet an, daß die kritische Masse z. B. bei der Entstehung von Dampfblasen zunimmt. Das ist für die Sicherheit des Reaktors außerordentlich wichtig.

7.4.2 Verteilung des Voidkoeffizienten in zwei zueinander senkrechten Brennelementreihen im kompakten Kern

Um einen genauen Überblick über die Verteilung des Voidkoeffizienten zu erhalten wurde dieser zusätzlich in verschiedenen Positionen in Reihe E und Reihe 5 des kompakten Kerns gemessen (vergl. dazu Abb. 5). Das 11,5 g - Teilelement war nicht in die Kernanordnung eingesetzt worden.

Die Ermittlung des Void-Koeffizienten in der Reihe E sei hier kurz erläutert: in dem unvergifteten kompakten Kern wird bei der letzten Ladung M_1 - vergl. Abb. 37 - der Wert (RCR) ermittelt. Nimmt man über den ganzen Kern eine symmetrische Verteilung an, so kann man einen maximalen Einfluß eines Absorbers auf die Reaktivität in der Position C der Elemente 4 und 5 und einen minimalen Einfluß in den Positionen A und E der Elemente 11 und 12 erwarten. In diesen Positionen wurde jeweils eine Annäherung an den kritischen Zustand durchgeführt und daraus die mittlere Neigung

$$\operatorname{tg} \alpha = (\operatorname{RCR})_1 / x$$

bestimmt, d. h.

$$x = (\operatorname{RCR})_1 / \operatorname{tg} \alpha$$

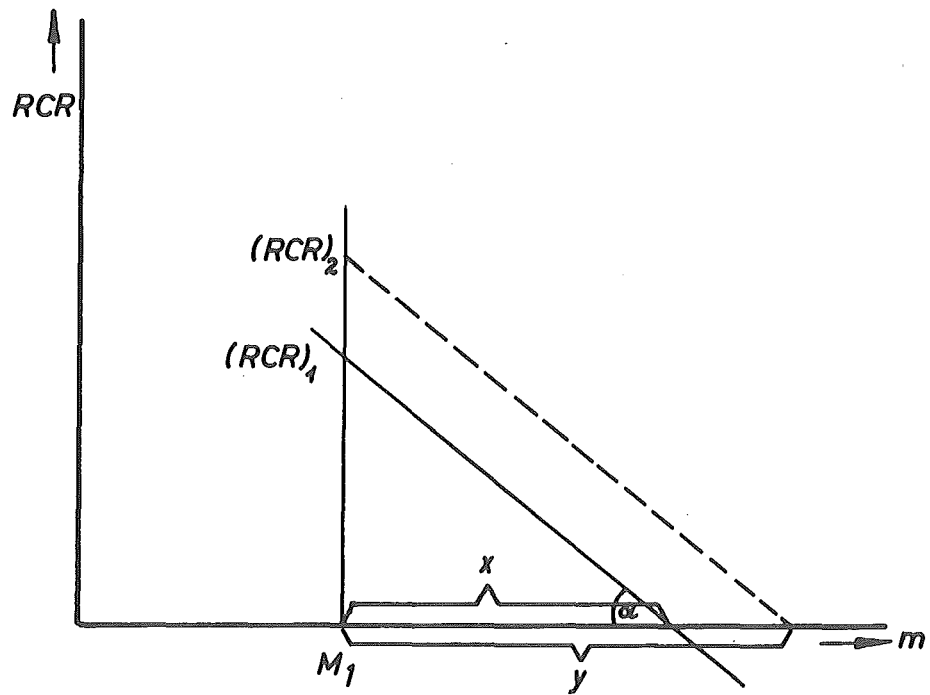
Man denke sich nun zwischen den beiden Brennelementreihen 5 und 6 eine Symmetrieebene gelegt. Dann werden je drei Absorber in Positionen der Elemente 11 bzw. 5 und gleichzeitig dieselbe Anzahl Al-Streifen in solche Positionen der Elemente 12 und 4 gebracht, die zu den ersten Absorbern spiegelbildlich gelegen sind hinsichtlich der Ebene. In zwei entsprechenden Positionen - z. B. 11 A und 12 E - ermittelt man den Wert $(\operatorname{RCR})_2$ (s. Skizze). Unter der Annahme gleicher Neigung beträgt dann die gesuchte Änderung der kritischen Masse:

$$y = \operatorname{ctg} \alpha (\operatorname{RCR})_2 ,$$

die sich wieder in prozentuale Reaktivitätsänderung / cm^3 Void umrechnen läßt. Die auf diese Weise ermittelte Verteilung des Voidkoeffizienten in Reihe E des kompakten Kerns gibt Abb. 38 wieder.

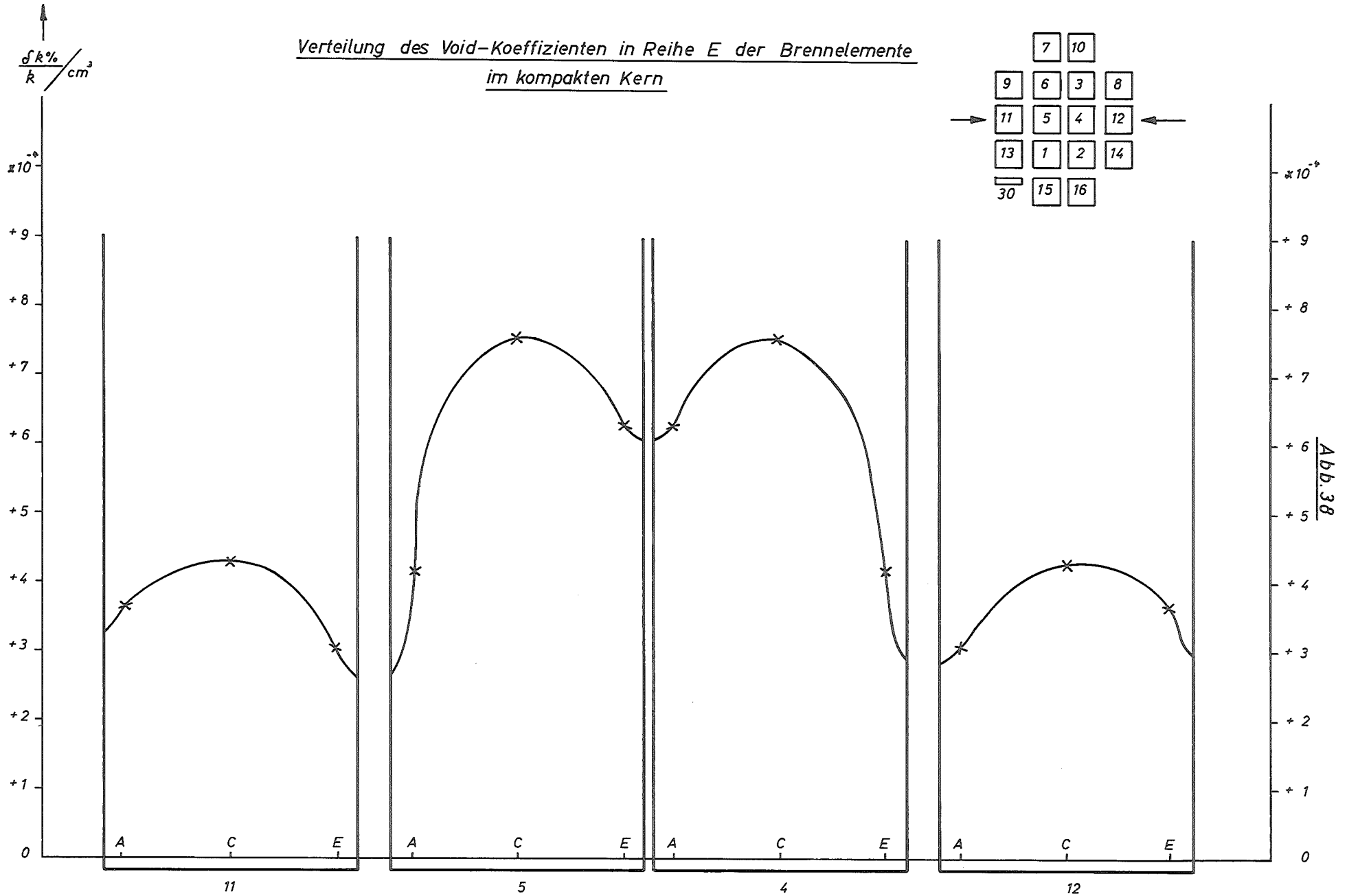
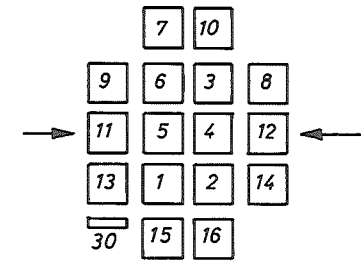
Für die Ermittlung der Verteilung des Voidkoeffizienten in Reihe 5 des kompakten Kerns denke man sich durch das Zentrum von Element Nr. 4 eine Symmetrieebene gelegt. Dann werden in 2 Spalten zwischen Brennstoffplatten, die spiegelbildlich zu dieser Ebene liegen, eine Anzahl Al-Streifen eingeführt und die dazugehörigen RCR-Werte berechnet. Für den in der bekannten Weise ermittelten Voidkoeffizienten erhält man dann eine Verteilung gemäß Abb. 39.

Abb. 37



Schematische Darstellung des Verfahrens zur Ermittlung
des Void-Koeffizienten.

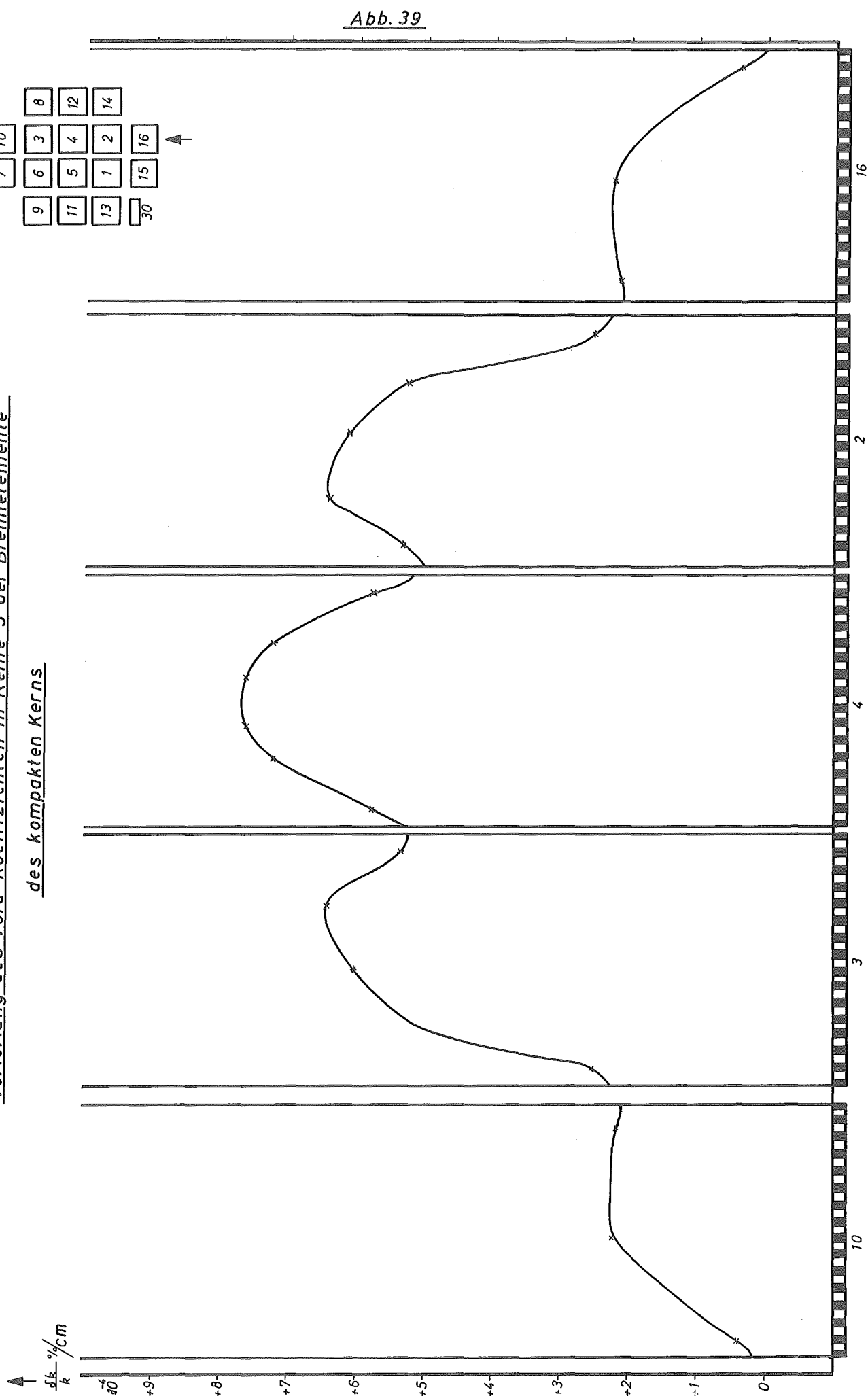
Verteilung des Void-Koeffizienten in Reihe E der Brennelemente
im kompakten Kern



Verteilung des Void-Koeffizienten in Reihe 5 der Brennelemente

des kompakten Kerns

7	10	8
6	3	12
5	4	14
9	11	13
1	2	15
16	30	



Ein Vergleich beider Verteilungskurven zeigt, daß im Zentrum von Brennelement 4 der Voidkoeffizient praktisch den gleichen Wert besitzt.

Messungen des Voidkoeffizienten, die in dem Nullenergiereaktor "HORACE", AWRE Aldermaston an einem 17 Elementkern mit Mg-Streifen durchgeführt worden waren, zeigten einen entsprechenden Verlauf und waren auch von gleicher Größenordnung.

Man kann den oben angeführten Kern mit dem zentralen Luftvoid als kompakten Kern auffassen, in dem das Brennelement Nr. 4 durch das Voidelement - dem Al-Kasten von 3,25 mm Wandstärke und den Abmessungen $6,885 \times 6,653 \times 79,375 \text{ cm}^3$ - ersetzt worden ist. Gegenüber dem kompakten Kern ($M_c = 2638,4 \text{ g U}^{235}$) bedeutet die Einführung des Voids eine Zunahme von 400,7 g ($M_c = 3038,7 \text{ g U}^{235}$). Mit dem Proportionalitätsfaktor des kompakten Kerns $C = 4,4$ ergibt sich somit die prozentuale Reaktivitätsänderung

$$\delta \rho = 2,99 \%$$

In diesem Zusammenhang dürfte ein Vergleich der Reaktivitätsänderung von Interesse sein, die man unter Heranziehung des Voidkoeffizienten ermittelt. Das in Frage kommende Luftvolumen des Voidelementes - unter Berücksichtigung des Reaktivitätsverhältnisses gleicher Volumina Luft und Aluminium (s.o.) - beträgt dann etwa $4221,4 \text{ cm}^3$. Entnimmt man den Verteilungskurven Abb. 38 und 39 für Brennelement Nr. 4 einen mittleren Voidkoeffizienten von $6,44 \times 10^{-4} \% / \text{cm}^3$, so erhält man auf diese Weise eine Reaktivitätsänderung von

$$\delta \varphi = 2,72 \%$$

Beide Werte stimmen also sehr gut überein.

8. Schluß

Man muß bei den Ergebnissen der unterkritischen Versuche stets berücksichtigen, daß sie durch eine Extrapolation berechnet wurden. Daher muß man mit Abweichungen von den wirklichen Verhältnissen im Reaktor rechnen. Aus der Art der Extrapolation kann man aber für die Abweichungen erwarten, daß die hier ermittelten Werte kleiner sind als die entsprechenden im Reaktor. - Andererseits hat die Erfahrung gezeigt, daß die im Reaktor ermittelten Größen, z. B. die exakte kritische Masse oder die Werte der Regelemente aus der Verdopplungszeit sehr gut mit den Werten, die aus unterkritischen Messungen folgen, übereinstimmen.

An dieser Stelle sei Miss J. Leigh und Mr. R.S. Curtis für die Hilfe bei der Durchführung und Auswertung der Experimente, sowie Dr. P. N. Cooper, Dr. K. Firth, Mr. M. Kerridge und Dr. W. Porschen für wertvolle Diskussionen sehr herzlich gedankt. Außerdem fühlen wir uns allen Mitgliedern der Reactor-Section des AEI-Research-Laboratory, an ihrer Spitze Dr. D. R. Chick und Dr. A. J. Salmon, für ihr stetes Entgegenkommen während unserer dortigen Tätigkeit sehr zu Dank verpflichtet. - Besonderer Dank gilt aber auch der Arbeitsgruppe Reaktorbau der Stadtwerke Düsseldorf unter der Leitung von Herrn Direktor Cautius und dem Vorstand der Kernforschungsanlage Jülich für ihre Unterstützung während der Durchführung der Arbeit.

9. Literaturhinweise

- 1) Cooper, W.M. and W. Porschen
AEI-Operational Report No. S 10, 1960
- 2) Burden, D.F.; E.A.Y. Caesar and M. Kerridge
AEI-Research-Report No. A 670, Sept. 1957
- 3) Chick, D.R.; M. Kerridge and A. J. Salmon
AEI-Research-Report No. A 722, Sept. 1957
- 4) Cooper, W.M.; H. Friedewold and J. Jacquemin
AEI-Research-Report No. A 1158, May 1961
- 5) Cooper, P.N.; W.M. Cooper and K. Firth
AEI-Research-Report No. A 1118, Nov. 1960
- 6) Anno, J.N.; A.M. Plummer and J.W. Chastain
2nd Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy
Papers A/Conf. 15/P/422, 1958
- 7) Cooper, P.N. AEI-Research-Laboratory
Reactor Section Memorandum R 62, Sept. 1960
- 8) Cooper, P.N. and R.F. Mathams,
AEI-Research-Laboratory
Submission No. 36/1/1960
- 9) Solari, P.A. Report No. AEI/JT 1337, März 1960
- 10) Solari, P.A. private Mitteilung
- 11) Birch, J. TNPG-Report No. 43, Jan. 61
- 12) Glasstone, S. and M.C. Edlund:
The Elements of Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand,
Princeton N. J. (1958)

10. Anhang

Das Verfahren zur Bestimmung des C-Faktors sei im folgenden kurz erläutert: Im Falle der Kritikalität sind geometrische und materielle Flußwölbung gleich. Die geometrische Flußwölbung ist:

$$(A) \quad B_g^2 = \left(\frac{\pi}{a+2s}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b+2s}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c+2s}\right)^2$$

wobei a, b und c die Kantenlängen des Kerns und s die Reflektorsparnis (= 7,68 cm) bedeuten. Nach der Zwei-Gruppen-Diffusionstheorie ergibt sich die materielle Flußwölbung zu:

$$(B) \quad \mu^2 = \frac{1}{2} \left[- \left(\frac{1}{L_1^2} + \frac{1}{L_2^2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{L_1^2} + \frac{1}{L_2^2} \right)^2 + \frac{4(k-1)}{L_1^2 L_2^2}} \right]$$

Dabei haben L_1^2 bzw. L_2^2 die Bedeutung der Quadrate der Abbrems- bzw. Diffusionslänge und k stellt den unendlichen Multiplikationsfaktor dar. (Für den FRJ 1 mit 80 % angereichertem Brennstoff und 161 g U^{235} pro Brennstoffplatte wurden folgende Werte angegeben ⁷⁾ $L_1^2 = 56,014 \text{ cm}^2$ und $L_2^2 = 2,568 \text{ cm}^2$) Da $\mu^2 = B_g^2$ und diese Größe wiederum aus den Kernabmessungen gegeben ist, läßt sich k aus Gleichung (B) ausrechnen.

Führt man nun einen geringen Absorber, beispielsweise das Feinregelelement, in den Kern ein, so ändert sich die kritische Masse des Kerns, d. h. die Länge a geht über in die Länge $a + \delta a$, während die übrigen Kernabmessungen unverändert bleiben. Man denkt sich also die Brennstoffzunahme gleichmäßig über eine Seite des Kerns verteilt. Demzufolge erhält man eine neue geometrische Flußwölbung $B_g'^2$, die bei Kritikalität einer materiellen Flußwölbung μ'^2 gleich ist. Analog wie oben läßt sich dann

mittels der Gleichung (B) ein k' ausrechnen. Der Quotient von k und k' bildet aber den effektiven Multiplikationsfaktor k_e . Die relative Reaktivitätsänderung $\delta\beta$ ist dann

$$\delta\beta = \frac{k_e - 1}{k_e}$$

Diese ist andererseits proportional der Änderung der kritischen Massen bei ein- und ausgefahrenem Feinregelelement:

$$\delta\beta = \frac{1}{C} \frac{m_2 - m_1}{m_2} = \frac{1}{C} \frac{\delta m}{m} = \frac{1}{C} \frac{\delta a}{a}$$

da sich die Änderung lediglich auf die Seite a ausgewirkt hat. In dieser Gleichung ist $\delta\beta$ und $\delta a/a$ bekannt, so daß sich der Umrechnungsfaktor C ausrechnen läßt.

Dieses Verfahren läßt sich auch dann anwenden, wenn Voids in dem Kern eingebaut sind. In diesem Falle wird der Tatsache, daß Neutronen auch in das Innere des Voids entweichen, durch Hinzufügung eines Faktors B_v^2 zur geometrischen Flußwölbung Rechnung getragen. Es ist also dann:

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{a+2s}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b+2s}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c+2s}\right)^2 + B_v^2$$

Für einen gerade kritischen Kern ist die geometrische Flußwölbung wieder gleich der materiellen und daraus läßt sich B_v^2 bestimmen. Der Faktor C berechnet sich dann auf analoge Weise wie bereits oben angedeutet, man muß nur in der Formel

$$\delta\beta = \frac{1}{C} \frac{\delta m}{m}$$

die Größe des Voids mitberücksichtigen.

11. Übersichtstabelle

Kernanordnung	krit. Masse [g] U ²³⁵	Umrech- nungs- faktor C	Wert des Feinregелеlem. ¹⁾		Wert des Grobregелеlem. ¹⁾		Temperatur- koeffizient ¹⁾ $\alpha \times 10^5$	α neg. ober- halb
			[g] U ²³⁵	%Reakt.	[g] U ²³⁵	%Reakt.		
kompakter Kern	2638,4 $\pm 0,8$	4,4	25,5 $\pm 0,9$ 39,4 $\pm 2,9$	0,22 0,34	609,8 $\pm 1,3$	4,27	4,63 - 0,128xT	36°
Quadratischer Kern	2659,9 $\pm 0,6$							
Länglicher Kern	3205,3 $\pm 2,4$	7,8	119,6 $\pm 2,8$ 154,7 $\pm 1,8$	0,46 0,59	546,7 1,9		7,94 - 0,220xT	36°
Kern mit zen- tralem 3''x3'' Luftvoid	3038,7 $\pm 5,2$	4,5	24,2 $\pm 3,6$ 36,3 $\pm 2,8$	0,18 0,26	710,4 $\pm 5,2$	4,21	3,77 - 0,093xT	40°
Kern mit zen- tralem 3''x3'' Wasservoid	3255,0 $\pm 2,0$						12,20 - 0,178xT	69°
Kern mit zen- tralem 6''x6'' Luftvoid	4115,6 $\pm 1,9$	6,2	41,5 $\pm 2,2$ 59,5 $\pm 2,0$	0,16 0,23	651,5 $\pm 2,2$	2,20		
U-förmiger Kern	3434,6 $\pm 0,6$							

1) vergl. die Ausführungen dazu im Text